

REGISTRO DE HOLOGRAMAS A PARTIR DE OBJETOS PLANOS GENERADOS EN UN LCD

LEIDY MARCELA GIRALDO CASTAÑO

Trabajo de grado presentado como requisito parcial para optar al título
de Ingeniería Física

Asesor:

Daniel Velásquez Prieto

Grupo de Óptica Aplicada
Ingeniería Física
Departamento de Ciencias Básicas
Universidad EAFIT
Medellín, Colombia
2012

Agradecimientos

A mi asesor Daniel Velásquez, su pragmatismo, motivación y dedicación, ayudaron en gran medida al avance de este trabajo. Por tener la paciencia para no permitir que con mi terquedad se perdiera el foco en el desarrollo del proyecto y por sus aportes y consejos que me han hecho mejor persona.

A mis padres que incondicionalmente han creído en mí, por su gran respeto y apoyo a su manera en mis decisiones.

Y a mis amigos por ser los bastones que me dan luz en el camino.

Gracias

Contenido

Introducción	9
1. Planteamiento del problema.....	11
1.1 Objetivos	12
1.1.1 Objetivo General	12
1.1.2 Objetivos Específicos	12
2. Fundamentos Teóricos	15
2.1 Holografía.....	15
2.1.1 Hologramas de Transmisión y Reflexión	21
2.1.2 Hologramas plano-imagen.....	22
2.2 Estereoscopía.....	24
2.2.1 Fundamentos de estereoscopía.....	25
2.3 Estereoscopía Holográfica.....	29
2.3.1 Fundamentos de Estereoscopía Holográfica.....	31
2.3.2 Estereogramas holográficos centrados en la rendija.....	34
2.3.3 Estereogramas holográficos centrados en la placa	35
3. Estado del Arte	36
4. Consideraciones Experimentales	49
4.1 El LCD.....	50
4.1.1 Funcionamiento	52
4.1.2 Adecuación del Panel	54
4.2 El difusor	57
4.3 Materiales de Registro	60
5. Experimentos y Resultados.....	62
5.1 Registro de hologramas de transmisión.....	63
5.1.2 Montaje	63
5.1.2 Hologramas de transmisión.....	64

5.2 Mediciones de Polarización en el sistema.....	65
5.2.1 Ángulos de polarización entrada y salida del LCD.....	65
5.2.1.1 Modo OFF	66
5.2.1.1 Modo ON	67
5.2.2 Polarización del Difusor.....	69
5.2.2 Polarización en el montaje.....	71
5.3 Registro de Hologramas Plano-Imagen	72
5.3.1 Montaje	72
5.3.1 Ubicación de las Imágenes en el LCD.....	75
5.3.1.1 Registro de la matriz (H1).....	75
5.3.1.2 Registro del holograma plano-imagen (H2)	76
5.3.2 Matrices y hologramas plano-imagen de reflexión	78
5.4 Registro de Estereogramas Holográficos	80
5.4.1 Arreglo Experimental	80
5.4.1.2 Centrados en la Placa H1	83
5.4.2 Estereogramas Holográficos	85
5.4.2.1 Matrices para estereogramas centrados en la rendija	86
5.4.2.2 Holograma plano-imagen a partir de matriz centrada en la rendija.	87
5.4.2.2 Matrices para estereogramas centrados en la placa	89
6. Conclusiones	93
Referencias.....	96

Lista de Figuras

Figura 1. Esquema simplificado para holograma de transmisión fuera de eje.....	17
Figura 2. Términos que aparecen en la reconstrucción de un holograma de transmisión.	20
Figura 3. Registro del patrón de interferencia sobre la emulsión.....	22
Figura 4. Etapas del registro H1 hasta visualización H2.....	23
Figura 5. Visión binocular.....	26
Figura 6. Relación entre la distancia del objeto al plano visual y el ángulo paraláctico.	26
Figura 7. Visualización de estereogramas según la convergencia de los ejes visuales.....	27
Figura 8. Representación simplificada del registro estereogramas holográficos..	32
Figura 9. Formación de las imágenes reales de las rendijas.	33
Figura 10. Esquema de vistas centradas con respecto a la rendija.	34
Figura 11. Esquema de vistas centradas con respecto a la placa.	35
Figura 12. Esquema propuesto por De Bitetto 1969 para matriz estereogramas holográficos HPO de dos pasos.....	37
Figura 13. Esquema propuesto por Lloyd Cross para estereogramas holográficos cilíndricos de reflexión.....	37
Figura 14. Dos vistas en diferente perspectiva estereograma holográfico: The Kiss II por Lloyd Cross y Pam Brazier..	38
Figura 15. Esquema modular para estereogramas holográficos de dos pasos.....	40
Figura 16. Configuraciones de captura.....	41
Figura 17. Sistema para proyección de imágenes en un difusor utilizando un LCD, para registro sobre película holográfica.....	42
Figura 18. Visualización de un holograma Alcove.....	45
Figura 19. Esquema generalizado de estereogramas holográficos con <i>full</i> -paralaje sobre sustratos curvos.....	45
Figura 20. Fotografías de ultragramas de reflexión de un solo paso..	46
Figura 21. Diagrama de un sistema para impresión de estereogramas holográficos.	48
Figura 22. Fotografía de un micro <i>display</i> LCD extraído de un <i>video beam</i>	51
Figura 23. Fotografía monitor LCD HPL1706 de 17”	52

Figura 24. Esquema celda de cristal líquido.....	53
Figura 25. Comportamiento de las moléculas de cristal líquido bajo diferencia de potencial aplicado.....	54
Figura 26. Sección transversal monitor LCD convencional.....	55
Figura 27. Foto modelo en CAD montura para monitor LCD.	56
Figura 28. Montaje real del panel LCD en su montura y su fuente de alimentación.	56
Figura 29. Dispersión de la luz a través de una superficie difusora.	57
Figura 30. Intensidad dispersada por un difusor lambertiano con un ángulo de difusión θ	58
Figura 31. Proyección de imágenes como haz objeto para registro de hologramas	59
Figura 32. Registro de hologramas de transmisión de objetos planos proyectados en un LCD.....	63
Figura 33. Registro hologramas de transmisión.....	64
Figura 34. Esquema de medida de potencia incidente al LCD.....	66
Figura 35. Esquema de medida intensidad máxima a la salida del LCD en modo OFF.....	67
Figura 36. Esquema de medida intensidad máxima con polarizador a la salida del LCD en modo OFF.....	67
Figura 37. Esquema de medida intensidad máxima con polarizador a la salida del LCD en modo ON y con fondo blanco.....	68
Figura 38. Esquema de medida intensidad máxima a la salida del LCD en modo ON y con fondo negro.....	68
Figura 39. Configuración polarizadores entrada y salida LCD	69
Figura 40. Difusor con superficie áspera del lado del medidor.....	69
Figura 41. Difusor con superficie lisa del lado del medidor.	70
Figura 42. Configuración final difusor-polarizadores LCD.....	70
Figura 43. Montaje general para registro de matrices y hologramas plano-imagen.	74
Figura 44. Fotografía montaje real versátil para registro de matrices y hologramas plano-imagen.....	74
Figura 45. Registro del H1	76
Figura 46. Reconstrucción de la matriz H1	76
Figura 47. Registro del H2	77
Figura 48. Visualización del H2.....	77

Figura 49. Fotografía de la reconstrucción de la imagen virtual ortoscópica para el registro de la matriz H1 en AGFA8E75	78
Figura 50. Fotografía de la reconstrucción con luz blanca del holograma plano-imagen H2, en PFG-03M.	79
Figura 51. Montaje general para registro de matrices para estereogramas holográficos y plano-imagen de reflexión.	80
Figura 52. Secuencia de 6 fotogramas para un dado con rotación en el eje y.	81
Figura 53. Configuración para el registro de estereogramas holográficos centrados en la rendija. El elemento móvil es el desplazador mecánico donde se encuentra sujeto el porta placas.	81
Figura 54. Fotografía rendija fija.	82
Figura 55. Fotografías sistema implementado para el registro de matrices de estereogramas holográficos con solo paralaje horizontal centrados en la rendija.	82
Figura 56. Fotografía del montaje experimental LCD-rendija-porta placas móvil, para estereogramas centrados en la rendija.	83
Figura 57. Configuración para el registro de estereogramas holográficos centrados en la placa. El elemento móvil es el desplazador mecánico donde está sujeta la rendija.	84
Figura 58. Fotografías sistema implementado para el registro de matrices de estereogramas holográficos con solo paralaje horizontal centrado en la placa.	84
Figura 59. Fotografía reconstrucción de imagen virtual para matriz de estereograma holográfico centrado en la rendija.	87
Figura 60. Fotografías de la reconstrucción del registro plano-imagen a partir de la matriz de la Figura 59 tomadas desde diferentes posiciones angulares del observador.	88
Figura 61. Visualización de estereogramas holográficos centrados en la rendija.	88
Figura 62. Fotografías de la reconstrucción del registro plano-imagen a partir de la matriz de la para objeto centrada en la placa, tomadas desde diferentes posiciones angulares del observador.	91
Figura 63. Visualización de estereogramas holográficos centrados en la placa.	91
Figura 64. Configuración para el registro de estereogramas holográficos centrados en la placa, utilizando un difusor a la salida del LCD para hacer más uniforme el haz objeto.	92
Figura 65. Fotografía de la reconstrucción del registro plano-imagen a partir de la matriz utilizando la configuración de la Figura 64.	92

Resumen

En los últimos años se ha dado un resurgimiento en el desarrollo de técnicas y dispositivos para generar imágenes 3D, algunos fundamentados en la estereoscopia y otros en la holografía. La estereoscopia holográfica, surge como una propuesta híbrida que aprovechando las ventajas de cada una de ellas, permite registrar conjuntos de pares estereoscópicos de manera holográfica que reconstruyen imágenes 3D con características superiores a los estereogramas convencionales y soluciona algunas de las dificultades inherentes a la holografía.

En este trabajo se hace una propuesta de un sistema óptico alternativo en el que se utiliza un monitor LCD convencional como sistema de proyección, con el fin de generar las condiciones experimentales necesarias que posibiliten el registro de hologramas y la obtención de estereogramas holográficos bajo diferentes configuraciones.

Se evaluaron las condiciones de polarización y del elemento difusor del sistema, para mejorar su desempeño en el registro de hologramas de transmisión de objetos planos proyectados a partir de un LCD. A partir de estos resultados, se posibilitó la obtención de matrices que permitieron el registro de hologramas de reflexión plano-imagen y estereogramas holográficos para lo cuales se generaron las condiciones experimentales necesarias.

Introducción

Recientemente se ha dado un resurgimiento en el desarrollo de las técnicas y dispositivos para generar imágenes 3D de gran impacto, que son utilizadas en diferentes medios visuales; como el cine, la televisión y la fotografía.

Las técnicas convencionales de las que hacen uso estos dispositivos, parten de un principio físico conocido como estereoscopia. Cuando nos referimos a un estereograma, nos remitimos a un conjunto de imágenes sistemáticamente ubicadas que reproducen las condiciones de visión estereoscópica, de modo que permiten la reconstrucción de imágenes tridimensionales a partir de imágenes bidimensionales [1]. Sin embargo, sus limitaciones radican principalmente en los elementos externos, como gafas, que requiere el observador para ver de manera simultánea y cómoda los pares estereoscópicos y poder reconstruir las imágenes 3D.

Con la aparición del láser en la década del 60, la holografía propuesta desde 1947 [2], tuvo un gran avance y logró generar imágenes 3D con características excepcionales; con la ventaja adicional que para su reconstrucción el observador no requiere dispositivos adicionales; pero sus principales limitaciones radican en la posibilidad de registrar objetos inexistentes y escenas de gran formato.

Así que utilizando las ventajas de ambas técnicas se desarrolló una propuesta híbrida llamada estereoscopia holográfica [3][4]. Esta permitió el registro de

imágenes 3D sin limitación de formatos u objetos y sin el uso de dispositivos adicionales para su visualización, lo cual dista bastante de la holografía convencional incluso cuando esta utiliza láseres pulsados para holografar seres vivos o en movimiento.

Este tipo de registros corresponden a un conjunto de hologramas de diferentes perspectivas o estados en el tiempo de un objeto, multiplexados espacialmente sobre una misma placa holográfica [1]; para tal fin, es utilizada por lo general una rendija con desplazamiento mecánico que permita hacer registros de manera selectiva sobre la película, proyectando cada vez una vista distinta del objeto, con las consideraciones necesarias para que coexistan los pares estereoscópicos y poder hacer la reconstrucción dinámica del holograma mirando a través de la ventana con paralaje horizontal y/o vertical [3].

Autores como Stephen A. Benton [4][5], Graham Saxby [3], Michael W. Halle [6], Masahiro Yamaguchi [7] [8], y Kjell Einar Olsen [9], reportan en sus trabajos resultados orientados a obtener estereogramas holográficos mediante el registro de pares estereoscópicos de manera holográfica, a partir de la proyección de imágenes planas en un LCD y registradas sobre materiales de haluros de plata.

Así que viabilizar la obtención de registros holográficos de buena calidad a partir de objetos planos proyectados en un LCD, supone un acercamiento al registro de estereogramas holográficos y abre un área de innovación y adaptación tecnológica en nuestro país.

1. Planteamiento del problema

El principio fundamental de la estereoscopia holográfica parte de la utilización de un dispositivo (*display*) digital que opera como un modulador de la intensidad de luz (*Spatial Light Modulator* SLM) conectado a un computador, a partir del cual se presenta una imagen que se proyecta en una pantalla difusora para ser luego registrada holográficamente en un material fotosensible de haluros de plata [3][4].

El trabajo realizado y los resultados obtenidos en el desarrollo de este proyecto, tienen un alcance mayor al de la propuesta presentada en el Anteproyecto de Trabajo de Grado. En la propuesta inicial, se planteó estudiar la posibilidad de registrar hologramas analógico-digitales, de buenas características, a partir de fotogramas proyectados (imágenes planas) a través de un dispositivo de cristal líquido (*Liquid Crystal Display* LCD) obtenido de una pantalla plana de

computador. Para esto, se hizo necesario considerar las características del *display* bajo las condiciones de iluminación con luz coherente (luz láser) y su respuesta bajo las restricciones impuestas por la polarización, pixelación y difusión de la luz, inherentes al dispositivo [10]. Bajo estas condiciones, se observaron las características de los hologramas registrados en la configuración de transmisión y plano-imagen de reflexión, utilizando películas de haluros de plata de grano fino para las matrices, particularmente la AGFA-8E75, y para los registros de reflexión; la película Ultimate U08-monocolor y la película de grano ultra fino Slavich PFG-03M; utilizando los procesos químicos sugeridos por los fabricantes. En la propuesta inicial, se plantearon los siguientes objetivos expuestos en la sección 1.1

1.1 Objetivos

1.1.1 Objetivo General

Obtener hologramas de reflexión y transmisión con buena eficiencia de difracción, utilizando un LCD como sistema de proyección de imágenes planas.

1.1.2 Objetivos Específicos

1. Realizar una revisión del estado del arte y el marco general dentro del cual este proyecto basa su justificación.
2. Diseñar e implementar un montaje óptico versátil, que se acople al registro de hologramas de transmisión y reflexión.

3. Evaluar el efecto de los difusores y la pixelación en el sistema formador de imagen.
4. Evaluar el efecto de los polarizadores del LCD en términos de las condiciones de polarización necesarias para el registro del patrón de franjas que conforman el registro.
5. Obtener hologramas de transmisión y reflexión de buena calidad registrados en materiales de haluros de plata y evaluar su desempeño.

Habiendo obtenido resultados satisfactorios con el logro de estos objetivos iniciales y queriendo aprovechar las condiciones experimentales generadas con el LCD implementado, se buscó evaluar el sistema utilizándolo en el registro de estereogramas holográficos, sin pretender estudiar aún los problemas generales inherentes a la generación de este tipo de estereogramas.

En esta nueva etapa del trabajo, se pretendió evaluar las posibilidades del equipo y los requerimientos experimentales en el registro de estereogramas holográficos e identificar los problemas propios de la técnica, con miras a trabajos futuros.

Para esto se propuso el siguiente objetivo general:

Registrar estereogramas holográficos plano-imagen de reflexión.

Para lo cual se abordaron como objetivos específicos:

1. Construir los sistemas de rendijas, con posibilidades de desplazamiento para la realización del multiplexado espacial bajo diferentes configuraciones.

2. Generar pares estereoscópicos a partir de un objeto modelado en CAD.
3. Generar matrices de transmisión de pares estereoscópicos por desplazamiento de la rendija y desplazamiento de la placa holográfica.
4. Obtener estereogramas plano-imagen de reflexión.

2. Fundamentos Teóricos

2.1 Holografía

A mediados del siglo XX surge una técnica conocida como holografía, propuesta por Dennis Gabor en 1947 [2] y a quien se le otorgó el Nobel de física por su invención en 1971 [11]. Ésta técnica se presentó como una nueva posibilidad de generar imágenes tridimensionales, operando con principios físicos muy diferentes a los que operan en la estereoscopia y con posibilidades insospechadas para ésta. Con la aparición del láser en la década del 60 la holografía tuvo un gran avance y logró generar imágenes 3D de características excepcionales en cuanto a la capacidad que tienen estas imágenes de reconstruir el campo óptico del objeto registrado.

Es sabido que el campo óptico puede ser descrito por una onda que se compone esencialmente de dos términos, uno asociado a la amplitud y directamente relacionado con la intensidad y otro asociado con la fase. Así que cuando se habla que un holograma es capaz de reconstruir la información completa del campo óptico asociado a la luz reflejada del objeto, nos referimos a la capacidad del registro de difractar la luz en una dirección particular, con la distribución de intensidad y fase asociadas al objeto, es decir, de reconstruir la información completa de la onda.

En holografía, se hacen interferir dos haces de luz, uno de ellos porta información del objeto a registrar y el otro es un haz de referencia que permite hacer la comparación entre las fases de ambos haces y como resultado se obtiene una distribución de franjas brillantes y oscuras, que guardan la información de las variaciones de fase introducidas por la geometría del objeto en términos de la intensidad. En este proceso de registro, se requiere de un medio fotosensible capaz de almacenar en términos de la intensidad; los cambios de fase introducidos por el objeto así como sus variaciones de intensidad. Cuando dicho registro es procesado se obtiene el holograma, que en esencia es una red de difracción, la cual al ser iluminada adecuadamente puede reconstruir la información óptica completa correspondiente al objeto [12].

Matemáticamente este proceso puede ser descrito a partir del esquema de la Figura 1.

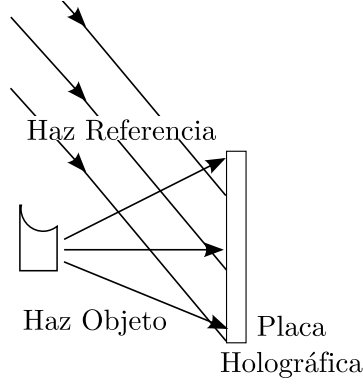


Figura 1. Esquema simplificado para holograma de transmisión fuera de eje.

Siendo $O(x, y)$ y $R(x, y)$ las amplitudes complejas del haz objeto y el haz de referencia respectivamente, sobre el plano del holograma (las letras mayúsculas constituirán la función compleja y las minúsculas el valor absoluto de la misma).

$$O(x, y) = o(x, y)e^{-i\Phi} \quad (1.1)$$

$$R(x, y) = r(x, y)e^{-i\Psi} \quad (1.2)$$

Por lo general $R(x, y)$ corresponde a una onda plana, entonces la fase $\Psi(x, y)$ dependerá del ángulo de incidencia con respecto a la película y estará dado por:

$$R(x, y) = r(x, y)e^{(-i2\pi\sigma_r x)} \quad (1.3)$$

En donde; σ_r , corresponde a la frecuencia espacial de la onda.

El patrón de interferencia resultante de la superposición del haz de referencia y haz objeto sobre la emulsión, constituye la información a registrar. La intensidad

registrada en la emulsión es el cuadrado de la suma de las amplitudes complejas de ambos haces.

$$I(x, y) = |R(x, y) + O(x, y)|^2 \quad (1.4)$$

Utilizando (1.1) y (1.2) se obtiene:

$$I(x, y) = |R(x, y)|^2 + |O(x, y)|^2 + R^*(x, y)O(x, y) + R(x, y)O^*(x, y) \quad (1.5)$$

Teniendo en cuenta (1.3), toma la forma:

$$I(x, y) = r^2 + o^2 + ro(x, y)e^{-2\pi i\sigma_r x} e^{-i\Phi(x, y)} + ro(x, y)e^{2\pi i\sigma_r x} e^{i\Phi(x, y)} \quad (1.6)$$

Se observa que la amplitud y fase del haz objeto aparecen en la ecuación de distribución de intensidad en el plano de la emulsión, es decir, que toda la información asociada al campo óptico de la luz reflejada del objeto ha sido registrada.

Utilizando la fórmula de Euler se obtiene:

$$I(x, y) = r^2 + o^2 + 2ro \cos(2\pi\sigma_r x + \Phi(x, y)) \quad (1.7)$$

Dado que esta información se registra sobre un material fotosensible, la transmitancia $t(x, y)$ de la película después de revelada queda expresada por la ecuación:

$$t = t_0 + \beta \tau I \quad (1.8)$$

En donde, t_0 corresponde a la transmitancia sin ninguna exposición en la película, β es el factor asociado al material de registro, y $E(x,t)$ es la exposición que corresponde al producto $E = \tau I$, siendo I la intensidad sobre la emulsión, dada por la ecuación (1.7) y τ el tiempo que se expuso la película. El resultado de exponer la emulsión a una intensidad $I(x,y)$ un tiempo τ da como resultado una transmitancia $t(x,y)$ del material dada por:

$$t(x,y) = t_0 + \beta \tau r^2 + \beta \tau o^2(x,y) + \beta \tau r o(x,y) e^{-2\pi i \sigma_r x} e^{-i\Phi(x,y)} + \beta \tau r^* o(x,y) e^{2\pi i \sigma_r x} e^{i\Phi(x,y)} \quad (1.9)$$

El holograma es revelado, secado y posteriormente iluminado con el haz de referencia $R(x,y) = r(x,y) e^{(-i2\pi\sigma_r x)}$, los términos presentes en la reconstrucción de la información son los contenidos en la función $U(x,y)$ de la ecuación (1.11).

$$U(x,y) = R(x,y)t(x,y) \quad (1.10)$$

$$U(x,y) = (t_0 + \beta \tau r^2)R(x,y) + \beta \tau o^2(x,y)R(x,y) + \beta \tau r^2 O(x,y) + \beta \tau r^2 O^*(x,y) e^{i4\pi\sigma_r x} \quad (1.11)$$

En esta función asociada a la reconstrucción de la información, aparece la contribución de cuatro términos como se observa en la Figura 2; los dos primeros corresponden a la onda de referencia transmitiéndose en el holograma, lo cual viene

a ser el orden cero de difracción con un halo a su alrededor y su magnitud depende de la relación referencia-objeto considerada en el registro, el tercer término corresponde al orden $+1$ de difracción, este término indica que la onda reconstruida viaja divergiendo del holograma, de modo tal que los rayos que crean la imagen parecieran provenir de la posición original del objeto, esto crea una imagen virtual ortoscópica o no deformada del objeto real. El último término corresponde al orden -1 de difracción, este orden reconstruye el conjugado complejo del haz objeto, lo cual indica que los rayos difractados en este orden viajan de manera tal que convergen a un foco real, esto crea una imagen real pseudoscópica, es decir que la profundidad de la imagen con respecto a la original se invierte y como resultado se obtiene un objeto deformado [13].

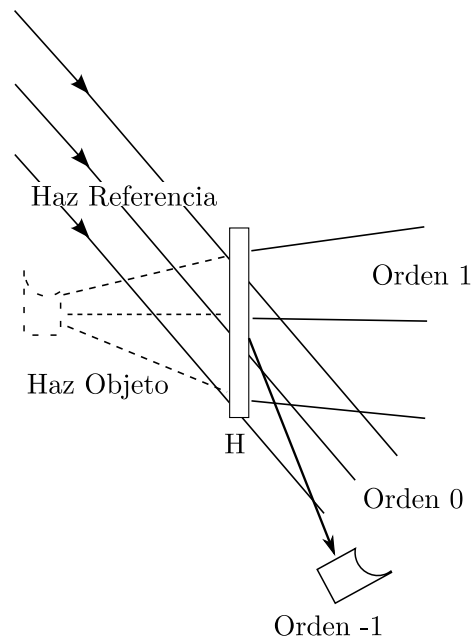


Figura 2. Términos que aparecen en la reconstrucción de un holograma de transmisión.

2.1.1 Hologramas de Transmisión y Reflexión

Los hologramas se pueden clasificar en dos tipos de acuerdo a la forma en que inciden sobre el material fotosensible los haces involucrados en el registro, estos pueden ser de reflexión (Denisyuk) o transmisión (Emmett Leith and Juris Upatnieks), la diferencia de fondo radica en la forma en que queda registrada la información asociada a la interferencia de ambos haces en el material. En los hologramas de reflexión la información se almacena en el volumen como planos distribuidos en el espesor de la emulsión d , que además son paralelos al plano de la película (Figura 3a), y para su reconstrucción pueden ser iluminados con luz blanca ya que operan como filtros selectivos, de manera tal que reconstruyen una única imagen correspondiente a la longitud de onda utilizada en la etapa de registro, satisfaciendo así el modelo de difracción de planos de Bragg [14].

Para el caso de los hologramas de transmisión, el patrón de interferencia queda registrado sobre la superficie de forma perpendicular a ella (Figura 3b). Al comportarse como una rejilla de difracción, las características del haz difractado son λ dependientes, así que para reconstruir fielmente el campo óptico del objeto estos hologramas deben ser iluminados con la misma longitud de onda que son registrados, es por eso que cuando se utiliza luz blanca para iluminar un holograma de transmisión, cada longitud de onda reconstruye el objeto en una posición angular y con una magnificación distinta, lo cual hace que el objeto reconstruido se vea completamente borroso.

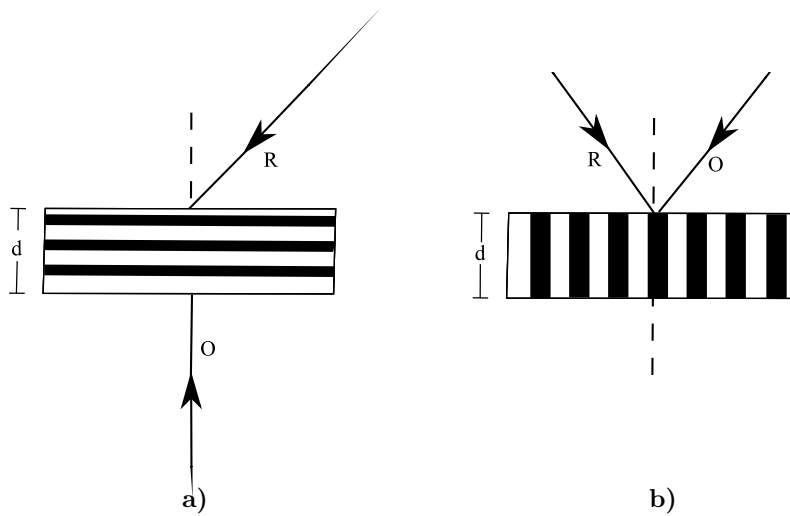


Figura 3. Registro del patrón de interferencia sobre la emulsión. (R: haz de referencia, O: haz objeto, d: espesor de la emulsión **a)** Holograma de Reflexión. **b)** Holograma de Transmisión.

2.1.2 Hologramas plano-imagen

Existen otro tipo de hologramas conocidos como hologramas de segunda generación, que corresponden a hologramas registrados a partir de una imagen holográfica; entre ellos los plano-imagen o de apertura completa. Estos aprovechan la imagen real pseudoscópica de un holograma de transmisión inicial llamado matriz o H1 como haz objeto para el registro de un nuevo holograma H2. Registrar un holograma de un holograma tiene varias ventajas, entre ellas que la película holográfica, para el registro del H2 puede ser posicionada en cualquiera de los planos de profundidad del objeto como una sección transversal, lo cual permite, al reconstruir el segundo holograma, observar parte del objeto detrás de la placa como una imagen virtual ortoscópica y parte por fuera como una imagen real ortoscópica, esto proporciona unos efectos interesantes al resultado final.

Este tipo de hologramas han sido muy utilizados en *displays* de exhibición ya que aumentan el dramatismo y realismo de este tipo de imágenes 3D [4], es por esto que generalmente los H2 son hologramas de reflexión.

Este tipo de hologramas conserva el paralaje horizontal y vertical del objeto original y típicamente tienden a ser hologramas muy brillantes, sin embargo, tienen una particularidad y es que el tamaño de la placa H1 se comporta como una ventana que hace parte del objeto, así que cuando el H2 es iluminado con el haz de referencia, se observan algunas restricciones en el paralaje, debido precisamente a esta ventana objeto que aparece. En la Figura 4 se esquematiza las etapas desde el registro del H1 hasta la visualización del H2.

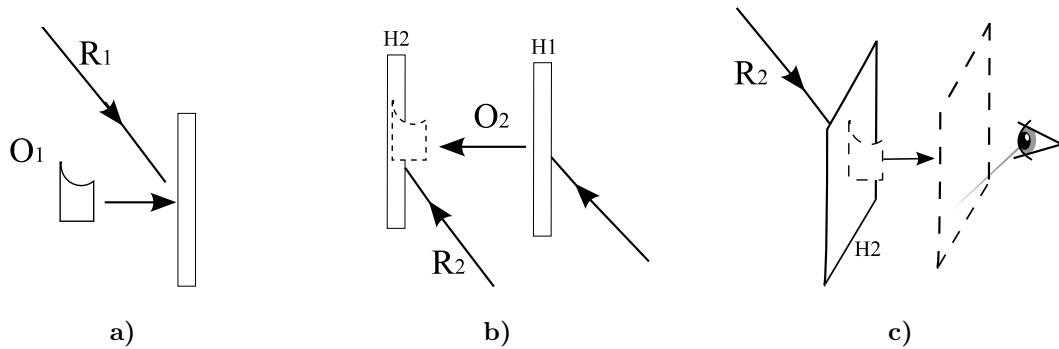


Figura 4. Etapas del registro H1 hasta visualización H2. a) Registro de H1. b) Registro de H2 de transmisión a partir de H1. c) Visualización de H2 con fuente monocromática.

Sobre estas consideraciones fundamentales se quiere destacar que los principios físicos involucrados en el proceso de registro y reconstrucción de un holograma, hacen que estas técnicas se diferencien por completo de los demás sistemas que buscan generar el efecto de la tridimensionalidad [15] en que la holografía es el único método posible para registrar toda la información óptica de un objeto y

reconstruirla, de modo que sean indistinguibles entre sí. Esto posibilita que para su reconstrucción no se requiera de ningún dispositivo adicional. Sin embargo, una de sus limitaciones radica principalmente en la dificultad de registrar escenas de gran formato u objetos inexistentes.

2.2 Estereoscopía

No son muy claros los orígenes de la fundamentación de la visión estereoscópica, sin embargo fue en 1838-1840 en que Sir Charles Wheastone [16] describió la teoría de la visión estereoscópica y patentó el primer dispositivo llamado estereoscopio que partía de la utilización de dibujos, ya que la fotografía era desconocida para ese entonces. Años después, este dispositivo fue perfeccionado y con el advenimiento de la fotografía se disparó su interés en el mundo del entretenimiento, con lo cual comenzaron a aparecer las primeras cámaras estereoscópicas cerca de 1850, sin embargo su impacto no perduró en el tiempo [17].

Los esfuerzos porque la estereoscopía se incorporara al cine fueron notorios aunque fue hasta 1890 que explotó el cine 3D y tuvo un impacto mundial con la propuesta del fotógrafo William Friese-Greene [16] (la primera cámara de cine estereoscópica), vinieron después las películas a partir de anaglifos, posteriormente las que utilizaban filtros polarizadores pero finalmente el 3D de la época desapareció dado la complejidad de los sistemas de filmación y proyección, sumado a un drástico desinterés del público.

Recientemente se ha dado un resurgimiento en el desarrollo de las técnicas y dispositivos para generar imágenes 3D de gran impacto, que son utilizados en diferentes medios visuales y de entretenimiento; como la fotografía, el cine, la televisión y los videojuegos. Pero aún hoy, todos ellos recurren esencialmente a los fundamentos de estereoscopía planteados desde finales del siglo XIX, presentando secuencias de imágenes a cada ojo separadas justamente la distancia intraocular (DIO) entre 45-75mm (65 mm es lo habitual) [18]. Su reaparición y retorno a nuestros días, ha estado estrechamente ligado al avance de herramientas computacionales para el procesamiento digital de imágenes, el significativo aumento en la capacidad de cómputo para almacenar y procesar pares estereoscópicos y al avance en los dispositivos electrónicos [16].

2.2.1 Fundamentos de estereoscopía

La sensación de relieve que percibimos está asociada con la visión binocular; la diferencia en la posición de nuestros ojos permite que se formen dos vistas ligeramente distintas de una misma escena; es a esto lo que se conoce como *disparidad retinal*; finalmente el cerebro es quien se encarga de superponer ambas perspectivas e interpretar la componente de profundidad (efecto conocido como *estereopsis*) [19]. En la Figura 5a se observan las trayectorias visuales para dos objetos A y B a diferentes distancias del plano visual.

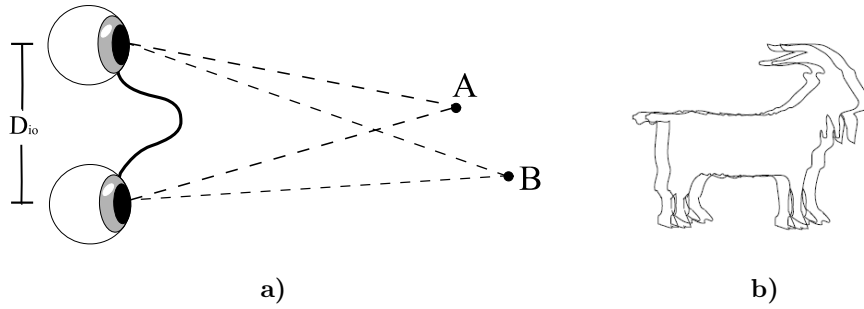


Figura 5. Visión binocular. **a)** Trayectorias visuales para dos objetos A y B. **b)** Superposición de las proyecciones en la retina de dos imágenes: efecto de *disparidad retinal*.

La interpretación de la profundidad, es decir, la posición a la que se encuentra un objeto del observador está asociada al ángulo α que forman los rayos de luz provenientes de un punto objeto cuando es enfocado (Figura 6), dicho ángulo se conoce como *ángulo paraláctico* [20].

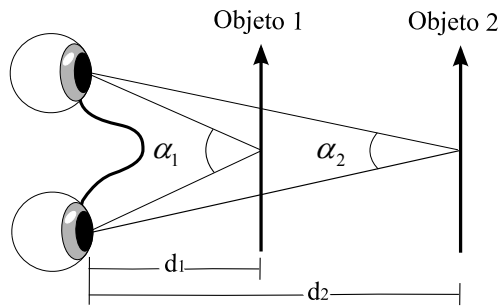


Figura 6. Relación entre la distancia del objeto al plano visual y el ángulo paraláctico.

Nótese que a mayor distancia entre el plano del objeto y el plano del observador menor es dicho ángulo, se expresa en radianes de acuerdo con la ecuación:

$$\alpha = \frac{D_{io}}{d} \quad (2.1)$$

Donde D_{io} , es la distancia intraocular y d , la distancia entre el plano del objeto y el plano del observador. Dependiendo del punto de vista desde el cual se observe un objeto, se produce una variación en los ángulos paralácticos, lo que da como resultado una variación aparente en la posición del objeto, lo cual se conoce como *paralaje*. Dependiendo del eje en que se evidencia, se habla entonces de paralaje horizontal o vertical y según la convergencia de los ejes visuales en: ejes convergentes, paralelos o cruzados como se observa en la Figura 7. Estos últimos permiten diferentes configuraciones a partir de las cuales es posible producir de manera artificial visión estereoscópica (*estereogramas*).

En la Figura 7a, ambos ejes ópticos convergen al plano de la pantalla, las fuertes dificultades están en que un sistema bajo esta configuración permita la observación de un par estereoscópico a la vez, por otro lado, en la visualización mediante *ejes paralelos* Figura 7b, típicamente se requieren elementos adicionales, por lo cual es una configuración generalmente usada para observar objetos en el infinito. Finalmente, la configuración de *ejes cruzados* Figura 7c, no es ampliamente utilizada debido a la dificultad presente de manera natural en la visualización de estas imágenes.

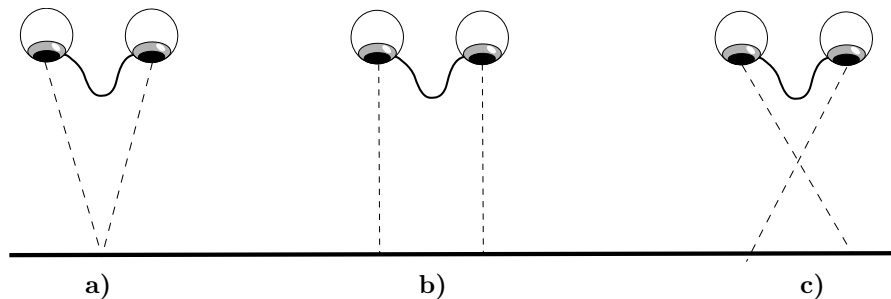


Figura 7. Visualización de estereogramas según la convergencia de los ejes visuales. a) Ejes convergentes. b) Ejes paralelos. c) Ejes cruzados.

Además del tipo de paralaje y la configuración de los ejes visuales, otro parámetro importante en la producción de estereogramas es la distancia entre los ejes ópticos de los elementos que capturan las imágenes, que en el caso de la visión estereoscópica humana corresponde a la separación intraocular y de manera más general se conoce como *separación interaxial*. Cuanto más grande es esta separación, mayor será la distancia a la que es posible observar el efecto de tridimensionalidad, aunque los objetos parezcan más pequeños [18].

Para conservar las proporciones en los estereogramas artificiales con respecto a la visión estereoscópica humana, se debe cumplir la condición:

$$DI = \frac{F_o * D_{io}}{F_c} \quad (2.1)$$

Donde, DI corresponde a la separación interaxial, F_o al foco del ojo, F_c foco de la cámara y D_{io} a la distancia intraocular.

Cuando nos referimos a un estereograma, nos remitimos entonces a un conjunto de imágenes sistemáticamente ubicadas que reproducen las condiciones de visión estereoscópica, de modo que permite la reconstrucción de imágenes tridimensionales a partir de imágenes bidimensionales [1]. Un conjunto de pares estereoscópicos conforma un estereograma y las imágenes que forman cada par estereoscópico deben mostrar la misma escena con una ligera disparidad horizontal, además de ser congruentes en brillo, contraste e intensidad. Dentro de los problemas típicos que aparecen en los estereogramas generados sintéticamente se encuentra el *cross-talk*,

que se manifiesta cuando el ojo derecho capta información de la perspectiva del objeto asociada al ojo izquierdo y viceversa, lo cual se traduce en la superposición borrosa de varias imágenes (*ghosting*) y finalmente en una pérdida de contraste de la escena completa. Otra de las molestias en la visualización de estereogramas sintéticos es conocido como *flickering* o parpadeo, que está asociado con el muestreo insuficiente de la escena, lo cual dificulta una reconstrucción de apariencia continua de la misma [21].

La estereoscopia como técnica para generación de imágenes tridimensionales tiene una gran ventaja en relación a la posibilidad de poder registrar objetos o escenas sin limitación de formato, tal como pueden ser escenas capturadas por una cámara de video [1], motivo por el cual aunque la estereoscopia precedió incluso la fotografía aún hoy impacta nuestro medio en la pantalla grande con el actual cine 3D. Sin embargo, sus principales limitaciones radican en los dispositivos adicionales (gafas o similares) que requiere el observador para ver de manera simultánea los pares estereoscópicos, además del nulo cambio de paralaje que experimenta un observador de una misma escena en diferentes posiciones.

2.3 Estereoscopia Holográfica

Aunque las imágenes holográficas han sido reconocidas como las imágenes tridimensionales más realistas [22], los requerimientos de estabilidad y la infraestructura requerida para obtener hologramas de grandes formatos han impedido que sea más popular y que avance más rápidamente [6].

Los hologramas tradicionales son por lo general estáticos y de objetos reales e inanimados, requieren de montajes ópticos y el proceso de interferencia ocurre de manera real. Y aunque la utilización de láseres pulsados potencia los registros holográficos de objetos vivos o en movimiento, los altos costos que implica la hacen poco accesible [23]. Por otro lado, el significativo aumento en la capacidad de cómputo y velocidad de procesamiento de los últimos años, ha posibilitado la generación de hologramas por computador, sin embargo, la cantidad de información almacenada en un holograma hace que la computación de patrones holográficos sea muy complicado y que hasta nuestros días, la creación de este tipo de hologramas aún no sea de carácter práctico.

Otra forma de desarrollar las técnicas tradicionales de holografía con láseres de He-Ne poco costosos, es el multiplexado angular o espacial sobre una misma película [1]. Sin embargo, en el caso del multiplexado angular hay una notable pérdida de eficiencia de difracción debida a la saturación del material, motivo por el cual es más común utilizar técnicas de multiplexado espacial, aprovechando la propiedad de los registros holográficos (en todos los puntos de la placa holográfica se posee información de todos los puntos del objeto visto desde esa perspectiva), de este modo se registran un conjunto de hologramas de diferentes perspectivas o estados en el tiempo de un objeto.

Nace entonces una propuesta híbrida conocida como *estereoscopia holográfica* [4][24], que valiéndose del multiplexado espacial permite registrar vistas de un objeto de manera tal que al ser reconstruidas formen pares estereoscópicos

holográficos que reconstruyan de manera continua y dinámica el objeto mirando a través de la ventana con paralaje horizontal y/o vertical [3].

2.3.1 Fundamentos de Estereoscopia Holográfica

Los principios involucrados en la generación de estereogramas holográficos, parten del registro selectivo de vistas de un objeto a partir de métodos holográficos, de forma tal que al ser reconstruidos los hologramas de estas imágenes, se formen pares que satisfagan las condiciones de visión estereoscópica y recompongan una escena 3D.

Las vistas del objeto a registrar, pueden ser fotografías o cuadros de un modelo en CAD, que normalmente son presentadas en un LCD para ser proyectadas sobre un difusor y finalmente registradas de manera analógica mediante la interferencia de dos haces en una película para registro holográfico. Estas pueden ser registradas de manera selectiva sobre la película utilizando por lo general una rendija con desplazamiento mecánico; esta permite registrar “tiras” con cada una de las perspectivas seleccionadas para reconstruir la escena completa de manera secuencial, reduciendo sustancialmente la cantidad de información a registrar.

En una primera etapa, Figura 8a, las vistas son proyectadas sobre un difusor, la luz dispersada hace las veces de haz objeto y mediante la rendija móvil se registra un holograma de cada vista, por cada sección en la placa. En la reconstrucción con luz coherente de este primer registro de transmisión Figura 8b, se reconstruyen las

distintas perspectivas del objeto registradas y un observador puede ver las imágenes virtuales correspondientes de manera selectiva de acuerdo a su posición angular.

Sin embargo, en este punto aún no se reconstruyen las imágenes 3D, ya que las condiciones del registro no permiten que un observador en esta posición vea de manera simultánea dos imágenes que formen un par estereoscópico, para que esto suceda, el observador debe situar los ojos en la posición donde se encuentran las rendijas, que para el caso de la matriz H1 se encuentran situadas sobre la película misma como se observa en la Figura 9a, lo cual lo hace físicamente imposible. Esta última, es precisamente la razón por la cual se recurre a hacer un registro plano-imagen a partir de esta matriz.

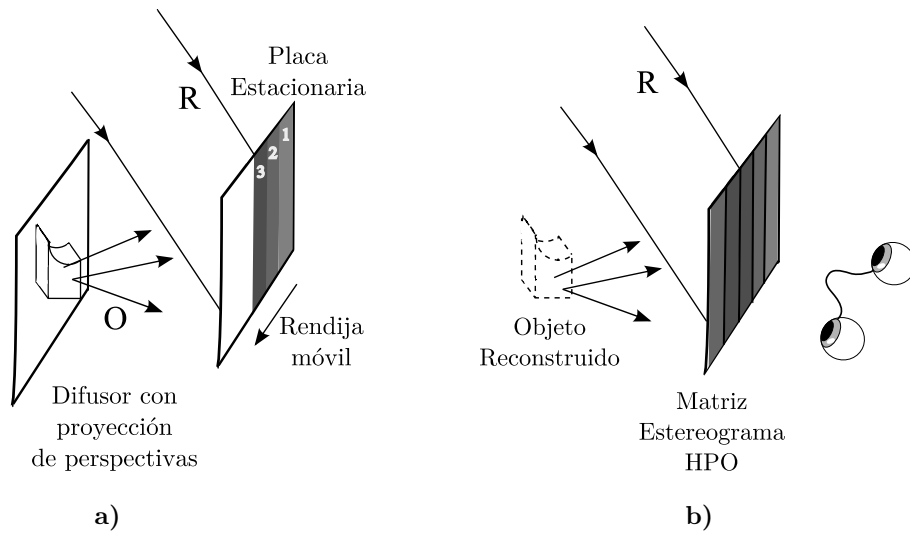


Figura 8. Representación simplificada del registro estereogramas holográficos. (a) y visualización (b) de un estereograma holográfico con solo paralaje horizontal.

Así como un holograma plano-imagen de apertura completa reconstruye la pareja ventana-objeto Figura 4c, un holograma plano-imagen de una matriz de estereoscopia holográfica reconstruye múltiples ventanas, cada una del tamaño de la rendija, lo cual permite reconstruir la pareja rendija-objeto de tal modo que las rendijas puedan situarse de manera real en el plano del observador, Figura 9b y por ende cada ojo pueda visualizar la reconstrucción de una de las vistas y finalmente recomponer la escena en 3D.

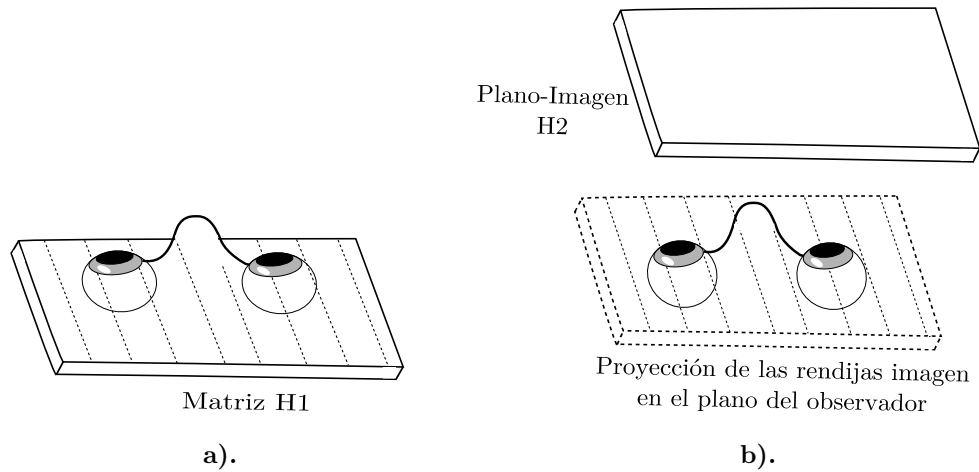


Figura 9. Formación de las imágenes reales de las rendijas. a). Imágenes reales de las rendijas formadas por H1 b). Imágenes reales de las rendijas formadas por el H2. Tomado de [6].

En los estereogramas holográficos, el paralaje de una escena se muestrea en vistas discretas, entonces la imagen de cada punto está compuesta como contribución de todas las perspectivas discretas que hayan sido registradas; pero la posición del observador es quien selecciona qué punto imagen es visible. Es claro que en comparación con un holograma tradicional, la información de la escena en un estereograma holográfico se ve altamente reducida y el número de vistas es escogido sin tener en cuenta la capacidad de almacenamiento del medio de registro sino más

bien satisfaciendo la pregunta de cómo adecuar las perspectivas capturadas a la percepción ocular humana [6].

Como se mencionó anteriormente, para obtener un estereograma holográfico, se requiere del registro selectivo de las imágenes (que conforman las distintas perspectivas de un objeto) sobre la emulsión. Esto se puede hacer en esencia de dos formas que dependen del elemento móvil del sistema y en ambos casos, las características del resultado final son diferentes.

2.3.2 Estereogramas holográficos centrados en la rendija

Cuando el elemento móvil en el montaje opto-mecánico para el registro de estereogramas es el porta placas y la rendija permanece fija, ocurre que cada una de las vistas queda centrada con respecto a la rendija, es decir, las imágenes reconstruidas se ubican justo en frente de ella como se observa en la Figura 10, así que la forma de recomponer las imágenes 3D es dirigiendo la vista al infinito viendo un estereograma de ejes paralelos Figura 7b, lo cual resulta naturalmente incómodo.

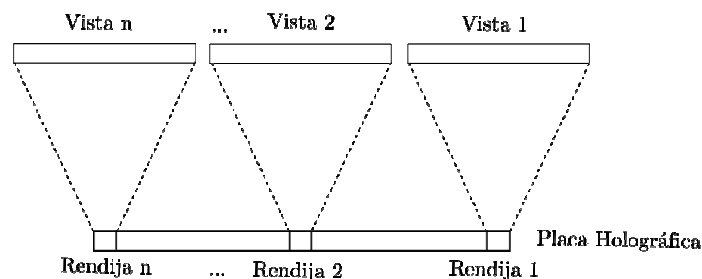


Figura 10. Esquema de vistas centradas con respecto a la rendija.

2.3.3 Estereogramas holográficos centrados en la placa

Caso contrario ocurre cuando la placa es quien permanece fija y la rendija es móvil, ya que las vistas registradas al ser reconstruidas convergen en una misma posición espacial como se observa en la Figura 11, lo que permite una visión cómoda de este tipo de estereogramas ya que se forman pares de ejes convergentes Figura 7a.

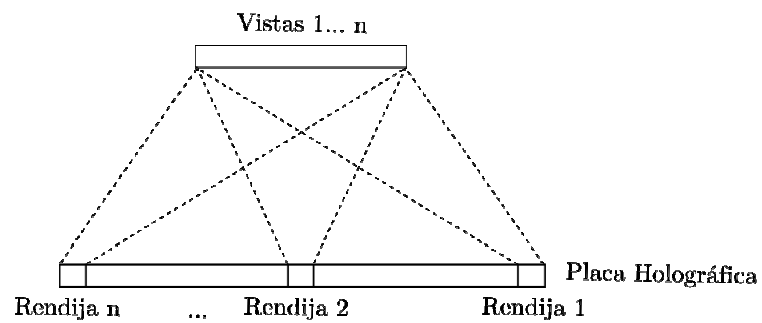


Figura 11. Esquema de vistas centradas con respecto a la placa.

3. Estado del Arte

Los primeros métodos para la generación de estereogramas holográficos fueron planteados a finales de los años 60's y comienzos de los 70's. Los pioneros en este tema, MacCrickerd y George utilizaron la técnica haciendo uso de proyecciones secuenciales de fotografías [24]. Posteriormente en 1969, DeBitetto utilizando fotogramas de cine equiespaciados a lo largo de una línea horizontal y proyectándolas con luz láser sobre un difusor, construyó su objeto plano de manera que pudiera alternar entre los cuadros consecutivos y registrarlos como hologramas individuales sobre la misma emulsión, para después observar su efecto combinado [24], un esquema de su propuesta se observa en la Figura 12.

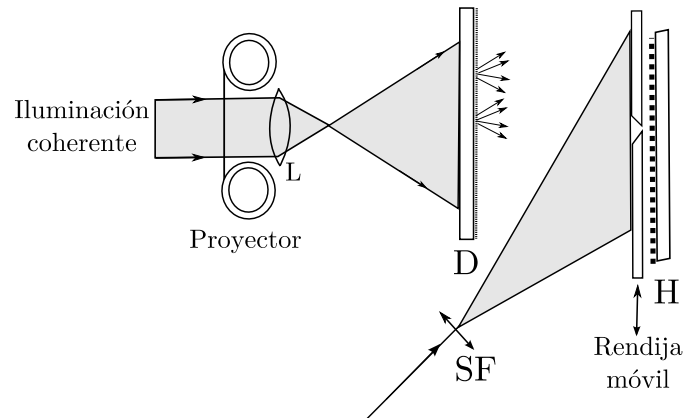


Figura 12. Esquema propuesto por De Bitetto 1969 para matriz estereogramas holográficos HPO de dos pasos (L: lente, D: difusor, SF: filtro espacial, H: placa holográfica).

Otras técnicas de mayor complejidad en el montaje incluyen las de generación de estereogramas holográficos cilíndricos obtenidos por Lloyd Cross y su alumna Pam Brazier para lo cual incluyen en su montaje un par de juegos de lentes cilíndricas [3]; un montaje simplificado de la propuesta de Cross se observa en la Figura 13 y uno de los resultados mas conocidos, The Kiss II, es presentado en la Figura 14.

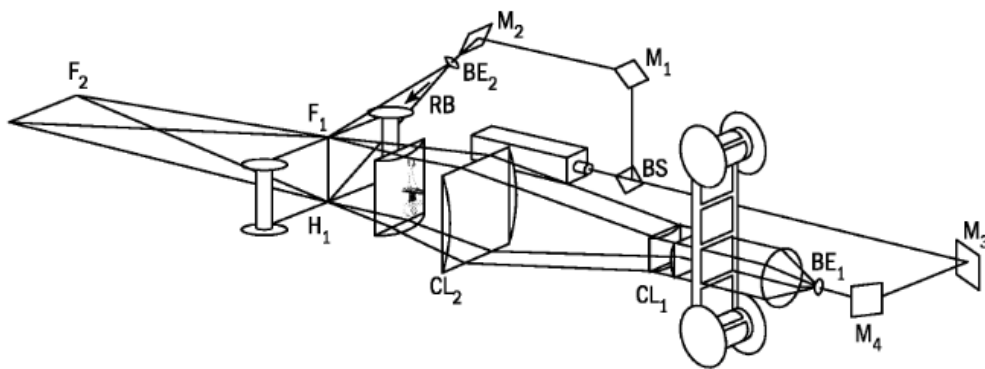


Figura 13. Esquema propuesto por Lloyd Cross para estereogramas holográficos cilíndricos de reflexión. Tomado de [3] p284.

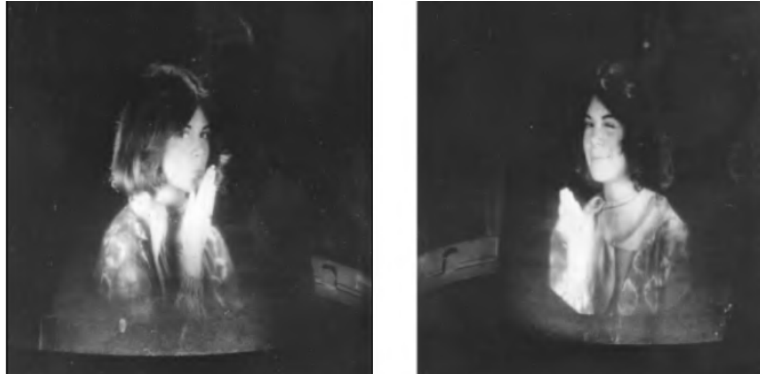


Figura 14. Dos vistas en diferente perspectiva estereograma holográfico: The Kiss II por Lloyd Cross y Pam Brazier. Tomado de [3] p284.

Sin embargo, este tipo de estereogramas presenta aberraciones debido a la óptica astigmática. Huff y Fusek [25] dedicaron su trabajo (1982) a reducir varias distorsiones e impedir que la imagen se viera más larga.

Un estereograma holográfico resulta entonces en la eliminación de la información punto a punto del frente de onda asociado al haz objeto a favor de la discretización para reducir la cantidad de información registrada, lo cual posibilita el registro de una mayor cantidad de escenas de lo que es posible con holografía convencional [4]. En esencia, los estereogramas holográficos se pueden clasificar en dos grandes grupos, los de un paso donde las rendijas están situadas en el plano del holograma final, y en donde los registros se hacen directamente como hologramas de reflexión como el caso particular de la propuesta original de Lloyd Cross; y los de dos pasos que utilizan una matriz de transmisión como paso intermedio para posicionar las rendijas finales en otro plano como la propuesta originalmente planteada por De Bitetto [5]. Sin embargo, las propuestas desarrolladas por Lloyd Cross fueron

protegidas con patentes recibiendo el nombre de Multiplex TM, lo cual tuvo implicaciones directas en los desarrollos posteriores en el área.

Un equipo de trabajo con amplio recorrido y que recogió y fundó las bases formales de la actual estereoscopia holográfica, fue el grupo de Stephen Benton, del Spatial Imaging Group del MIT, quienes decidieron retomar la idea inicial de De Bitetto sumada a la idea de utilizar un LCD como objeto, propuesta por Dolsgaard e Ibsen en 1988 [26]. La aparición del LCD simplificó de manera muy efectiva la producción de imágenes primarias para la matriz y ha hecho posible generar imágenes sintéticas directamente desde un computador portátil.

Desde este punto, se han propuesto varios métodos para obtener la secuencia de vistas que no evidencien saltos bruscos en la dinámica del estereograma, además de consideraciones sobre los ángulos de visión, separación entre cada par estereoscópico y consideraciones en la instrumentación, automatización y generación de imágenes por computador que para esto han evolucionado también. En 1990 por ejemplo, Steve Smith propuso la adquisición de imágenes a partir de 12 cámaras fotográficas con el fin de hacer tomas y exposiciones simultáneas sobre la película [27]; esto último evidencia la alta complejidad y lo aparatosos que pueden alcanzar a ser estos sistemas.

De manera simplificada, en la Figura 15 se presenta un esquema por módulos de las diferentes etapas por las que se atraviesa para la generación de un estereograma

holográfico de dos pasos, pasando por la generación de una matriz primaria, hasta su visualización como un holograma de reflexión.

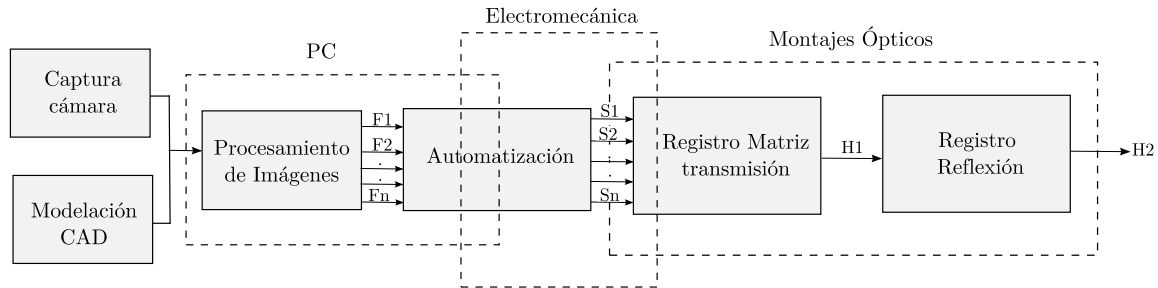


Figura 15. Esquema modular para estereogramas holográficos de dos pasos (F1:Fn son los fotogramas, S1:Sn señales que activan componentes mecánicos).

La primera etapa corresponde a la captura de las perspectivas del objeto, que más adelante conformarán los pares estereoscópicos. Si se quiere utilizar un objeto hecho en CAD la obtención de fotogramas se traduce en un problema de computación gráfica, lo cual vuelve más versátil el tipo de objetos o escenas que pueden ser registrados. Para un objeto o escena real, existen, como se muestra en la Figura 16, diferentes configuraciones válidas para la captura de las fotografías, para ser utilizadas posteriormente en la etapa de registro. En esencia, constituyen dos métodos, uno donde se requiere rotar el objeto o la cámara a condición de mantener las distancias constantes, Figura 16a, y otro donde el objeto o la cámara se desplazan de manera longitudinal; en esta última se pueden presentar dos configuraciones; una es mantener la cámara apuntando de manera perpendicular a la dirección del movimiento y cuidando que el desplazamiento de la cámara sea el mismo entre captura y captura Figura 16b o apuntando de manera radial al objeto Figura 16c cuidando que los ángulos entre exposiciones sucesivas sean iguales [3].

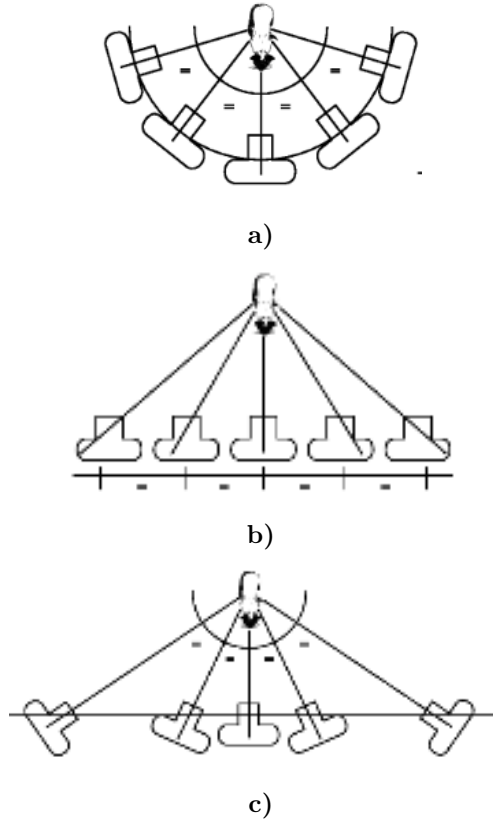


Figura 16. Configuraciones de captura. **a).** Las distancias entre la cámara y el objeto permanecen constantes. **b).** La cámara se desplaza longitudinalmente distancias iguales entre captura y captura. **c).** La cámara se desplaza longitudinal y angularmente conservando ángulos iguales entre capturas. Tomado de [3].

Para el registro del holograma, estas imágenes pasan a una etapa de digitalización y mediante la utilización de un dispositivo (*display*) digital que opera como un modulador espacial de intensidad (*Spatial Light Modulator SLM*) son presentadas secuencialmente y proyectadas en una pantalla difusora [3][4], como se observa en la Figura 17. Posteriormente estas perspectivas son registradas de manera selectiva sobre la película, utilizando por lo general una rendija con desplazamiento mecánico, que permita proyectar cada vez una vista distinta del objeto a la placa, con las consideraciones necesarias para que coexistan los pares estereoscópicos y

poder hacer la reconstrucción del estereograma holográfico mirando a través de las ventanas que reconstruyen las perspectivas individuales y que dan la sensación de paralaje con el desplazamiento longitudinal del observador [3].

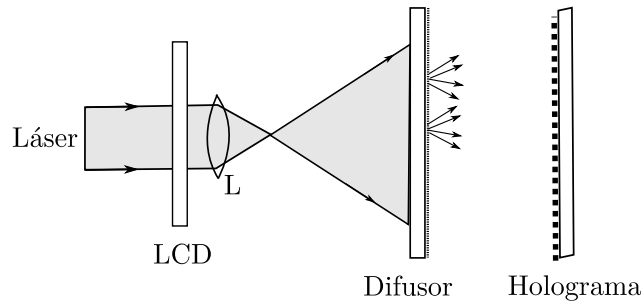


Figura 17. Sistema para proyección de imágenes en un difusor utilizando un LCD, para registro sobre película holográfica.

En la Figura 8, se observa una representación de manera simplificada del registro y la visualización de un estereograma holográfico de dos pasos, con paralaje horizontal únicamente (HPO).

La obtención de estereogramas holográficos con paralaje completo, esto es, sin pérdida de información vertical, implica extender el concepto de los sistemas de registro a un sistema 2-dimensional. En estos casos las vistas se registran en unidades de píxeles de volumen conocidos como “*hogel*” [4] (término acuñado por primera vez por Mark Lucent en 1994 [28]), de este modo, se conserva la información del paralaje vertical, aunque claramente las consideraciones en computación gráfica y restricciones geométricas son más exigentes para estos casos. Los primeros esfuerzos por lograr estereogramas holográficos de paralaje completo

fueron dirigidos por R.V. Pole en IBM desde 1966 utilizando un arreglo de lentes *fly's eye* seguido de un registro de reflexión de todas estas perspectivas [29].

Un punto crítico en la generación de estereogramas holográficos es lograr que no se presenten aberraciones ni distorsiones en la visualización final de las imágenes, ya que este tipo de problemas no pueden ser corregidos después de que aparecen en el *display*, entonces se busca evitarlos sometiendo los fotogramas antes de ser proyectados sobre el difusor, a las pre-distorsiones adecuadas dependiendo del plano de profundidad de la escena en el que se encuentren y de esta manera contrarrestar los efectos en el resultado final. Las imprecisiones en los ajustes del montaje mecánico pueden producir otro tipo de distorsiones como por ejemplo el efecto *keystone*, que se evidencia cuando las imágenes asociadas a un par estereoscópico no son exactamente paralelas y como resultado producen deformaciones trapezoidales en la visualización final [3] [6]. Otros problemas usuales en este tipo de *displays* son la reconstrucción de imágenes múltiples de manera simultánea y por ende pérdida de contraste conocido como *cross-talk* y la dispersión cromática; este último en particular debido a la dificultad de enfocar nítidamente en un solo plano la imagen real de la matriz sobre la placa H2 para la generación del plano-imagen de reflexión [1].

Como un sistema discreto de imágenes, los estereogramas holográficos además de ser susceptibles a aberraciones o distorsiones, también pueden presentar problemas debidos al muestreo inapropiado; la apariencia exacta de estos artefactos sobre el resultado final depende de la tasa de muestreo utilizada para discretizar la escena.

En el caso de un muestreo insuficiente se presenta un problema conocido como *aliasing*. Al no haber un muestreo suficiente para capturar todos los detalles de la escena, la calidad de la imagen se degrada y se observan discontinuidades marcadas en el paralaje de la escena cuando el observador se desplaza e incluso puede dar origen a patrones de moiré. De manera natural, se puede pensar que aumentar el número de cuadros solucionaría el problema, sin embargo, un sobre muestreo ocasiona que más perspectivas se hagan simultáneamente visibles al observador, rellorando los gaps entre vistas existentes [30], lo cual aumenta de manera directa el problema de *cross-talk*, además del aumento significativo en el tiempo de registro del estereograma completo.

Un apropiado muestreo es entonces requerido no solo para optimizar los tiempos de registro conservando una continuidad en la escena, sino para prevenir este tipo de distorsiones en el resultado final. Para esto, normalmente se toma en cuenta el criterio de Nyquist–Shanon que permite determinar el número y tamaño de rendija u *hogel* para obtener una imagen continua.

El muestreo óptimo y las pre-distorsiones que se aplican sobre las perspectivas del objeto, tienen una dependencia de las restricciones geométricas impuestas por el sistema objeto-estereograma-observador, considerando que esto implica la implementación de otras técnicas de computación gráfica más robustas y novedosos métodos de registro del holograma.

Dentro de los estereogramas holográficos de mayor formato que se han realizado, se encuentra por ejemplo el holograma Alcove. Este un tipo de *display* de paralaje completo de un solo paso que reconstruye la imagen en un sustrato curvo cóncavo de aproximadamente 180° [31], como se observa en las Figuras 18 y 19.

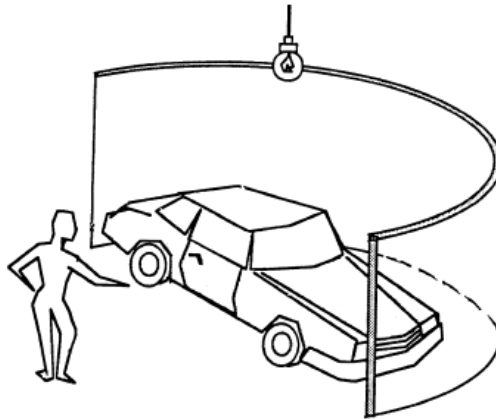


Figura 18. Visualización de un holograma Alcove. Tomada de [31].

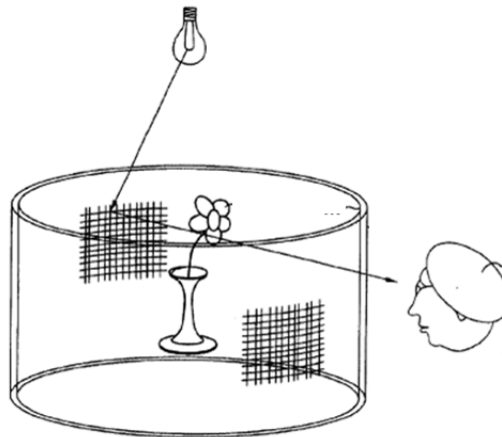


Figura 19. Esquema generalizado de estereogramas holográficos con *full*-paralaje sobre sustratos curvos. Patente asignada en 2003. Tomada de [32].

Los análisis para el desarrollo del holograma alcove fueron realizados por Michael A. Teitel en 1986 [31], apoyado en la parte de computación gráfica por Michael Holzbach. Las restricciones geométricas que se utilizaron en el desarrollo de este

holograma fueron para objetos muy específicos, lo cual impidió su uso de manera generalizada [5]. Así que en busca de una solución más general nació una propuesta que combinó varios parámetros interesantes que llevaron un paso más allá las características de los *display`s* con *full* paralaje que se habían ofrecido hasta el momento; aparece entonces un nuevo concepto conocido como el ultragrama, Este constituyó un esfuerzo importante por eliminar la distorsión que se presenta cuando la posición del observador no coincide con la localización de los *hogels* o rendijas reales que componen la imagen final [5]. Este tipo de estereogramas holográficos resultan ser mucho más realistas ya que ofrecen una gran área de visualización, mínimas distorsiones en la imagen y alta resolución espacial, de modo que permiten registrar mucha mas información que los HPO, y todo esto básicamente teniendo control de los parámetros involucrados por software [5]. La Figura 20 muestra dos fotografías de ultragramas de un paso desarrollados en el MediaLab del MIT.

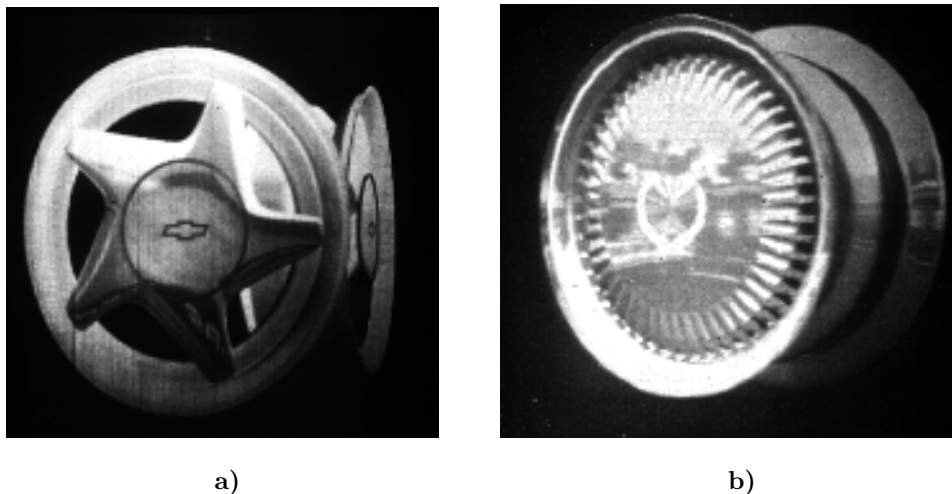


Figura 20. Fotografías de ultragramas de reflexión de un solo paso. **a).** Rueda de un Chevrolet.
b). Hubcap de un Cadillac.

Buscando que las imágenes reconstruidas sean lo más realistas posibles, los sistemas actuales no buscan únicamente poder reproducir el paralaje sino las condiciones de color y de iluminación real de los objetos, es por esto que estos sistemas han incorporado láseres RGB y por ende han requerido nuevos sustratos de registro pancromáticos, normalmente basados en haluros de plata y de grano ultrafino (entre los 10-12nm). Actualmente se encuentran en el mercado dos de estos materiales disponibles de manera comercial; la película Rusa PFG-03C de Slavich [33] y la francesa U08-C de Ultimate [34] sensibles en una amplia región del espectro visible.

Los intereses en la implementación de montajes de un solo paso para aumentar la velocidad de registro sin pasar por una matriz, la utilización de láseres RGB pulsados que aumenten significativamente la velocidad de estos sistemas e implementen el uso de materiales de registro como fotopolímeros que no requieren revelado húmedo como los haluros de plata, sino que utilizan un proceso de fotocurado con luz ultravioleta y calor, siendo además los materiales que alcanzan las mayores eficiencias de difracción reportadas en la literatura [15], dieron paso a un sistema más compacto y de mayor velocidad, con la funcionalidad de registrar estereogramas holográficos de paralaje completo y a color de cualquier tipo de objetos, conocido como holoprinter. En la Figura 21 se observa un diagrama del holoprinter presentado por Yamaguchi en 1990 [7] [8].

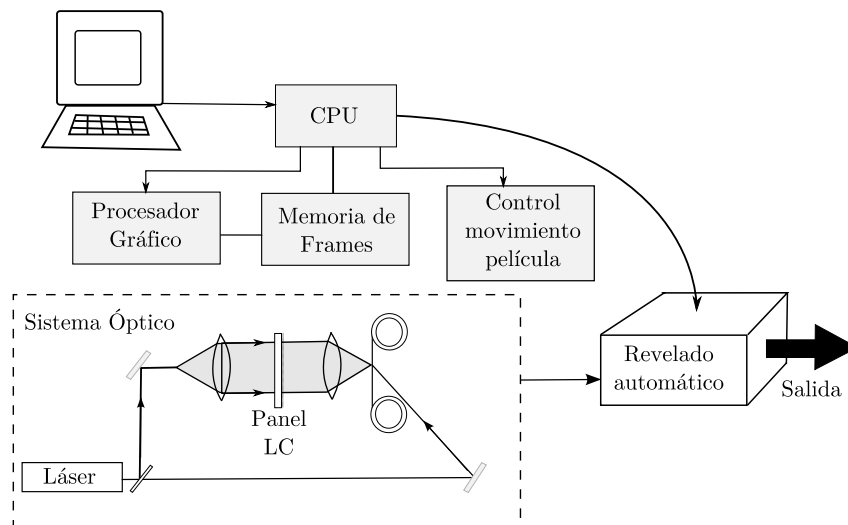


Figura 21. Diagrama de un sistema para impresión de estereogramas holográficos.

4. Consideraciones Experimentales

Con el propósito de generar las condiciones experimentales necesarias para obtener estereogramas holográficos de dos pasos, partiendo de utilizar iluminación monocromática y coherente, en este trabajo se adecuó e implementó un modulador LCD de bajo costo, obtenido de un monitor de computador y se hicieron consideraciones de acuerdo a las necesidades, restricciones y recursos, sobre los elementos requeridos para obtener un sistema opto-mecánico con la suficiente versatilidad partiendo de este elemento.

4.1 El LCD

En holografía convencional un objeto real es iluminado con luz coherente, la luz que se refleja del objeto es la que hace las veces de haz objeto e interfiere con un haz de referencia conocido que ilumina la placa; así que utilizar la luz que se transmite a través de la proyección de una imagen en un modulador espacial de luz (*Spatial Light Modulator*, SLM) como haz objeto y viabilizar el registro de hologramas de buenas características de imágenes planas a partir de un sistema como este, supone un acercamiento al registro de estereogramas holográficos de dos pasos.

Los SLM permiten variar de manera controlada ya sea óptica o eléctricamente la distribución espacial de fase y/o amplitud. Sin embargo, conseguir la modulación pura en cualquiera de las dos resulta bastante exigente considerando que a la salida del dispositivo por lo general estos parámetros se encuentran acoplados.

Un tipo particular de moduladores espaciales son los de cristal líquido; en estos el material activo responde a señales eléctricas. Sus características ópticas pueden ser obtenidas numéricamente tomando como punto de partida las matrices de Jones, de forma analítica, aunque no en todos los casos resulta práctico y por métodos experimentales, según lo reportado en la literatura se pueden obtener algunas aproximaciones [35]. Por otro lado, estos dispositivos suelen ser muy costosos y considerando que las intenciones del proyecto consisten en utilizar el dispositivo como un modulador de amplitud, se hace interesante pensar en pantallas basadas

en cristales líquidos nemáticos con estructura helicoidal disponibles comercialmente en sistemas de proyección y monitores [36].



Figura 22. Fotografía de un micro *display* LCD extraído de un *video beam*.

Utilizar un micro *display* extraído de un proyector (*Video beam*) como el mostrado en la Figura 22, tiene la desventaja de la poca información que el fabricante suministra al respecto, sumado a la necesidad de utilizar el circuito de control que forma parte del proyector, e interfazar el sistema con un PC externo para la generación de imágenes [35]. Aunque en el caso de los *displays* de cristal líquido de los monitores, los fabricantes tampoco proveen información detallada, estos presentan una serie de beneficios que resultan ser de interés para las intenciones de este trabajo:

1. Bajo costo.
2. Las imágenes pueden ser presentadas en tamaño real.
3. No requieren controladores externos.
4. La interfaz con el PC se hace de manera directa.

5. Los píxeles de estas pantallas son RGB por lo que permitiría favorecer la iluminación del *display* utilizando luz coherente blanca con láseres RGB.

Aunque tienen la desventaja que los polarizadores de entrada y salida son fijos.

4.1.1 Funcionamiento

Para la adecuación e implementación se seleccionó una pantalla de cristal líquido de monitor HPL1706 de 17'', de matriz activa TFT (transistor de película delgada) y con un tamaño de píxel de 0,264mm como la observada en la Figura 23.



Figura 23. Fotografía monitor LCD HPL1706 de 17''

Normalmente en cada celda o píxel se encuentran dos electrodos con alta transmisividad, en este caso basados en transistores de película delgada (TFT: *thin-film transistor*). Entre los electrodos se encuentra el material de cristal líquido que para el caso del monitor seleccionado es del tipo nemático con estructura helicoidal,

es decir, que la estructura básica de estos cristales corresponde a un giro continuo de las moléculas que usualmente alcanza los 90° [37].

Por lo general, el conjunto de celdas (pixeles) se dispone entre dos polarizadores cruzados lineales, una representación gráfica se observa en la Figura 24.

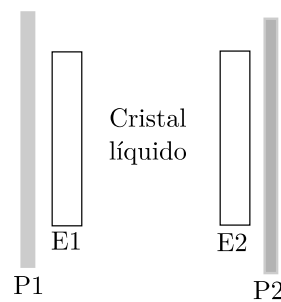


Figura 24. Esquema celda de cristal líquido (E1 y E2: electrodos. P1 y P2: Polarizadores)

La orientación de estos polarizadores determina los ángulos directores del sistema, es decir, las orientaciones de las moléculas a la entrada y a la salida del cristal y en respuesta a las señales eléctricas que se envían a cada celda, se producen entonces rotaciones en el vector molecular de la estructura helicoidal del cristal líquido de cada píxel y por lo tanto variaciones de intensidad de la luz transmitida.

De manera natural, las moléculas de cristal líquido se encuentran relajadas y entorchadas en cada celda, alineadas a la entrada y a la salida por los ángulos de los polarizadores como se observa en la Figura 25, así que en ausencia de voltaje el vector molecular no se ve alterado y por ende en la salida del segundo polarizador se obtiene la mayor transmitancia y como consecuencia el píxel es brillante (ver Figura 25a).

Caso contrario ocurre al aplicar una diferencia de potencial en los electrodos; en este caso se produce una reorientación de las moléculas de cristal líquido y en el caso de aplicar la máxima tensión permitida por la celda, se produce un desentorchamiento completo de la hélice, que da como resultado el caso de mínima transmitancia y en consecuencia un píxel oscuro (ver Figura 25b).

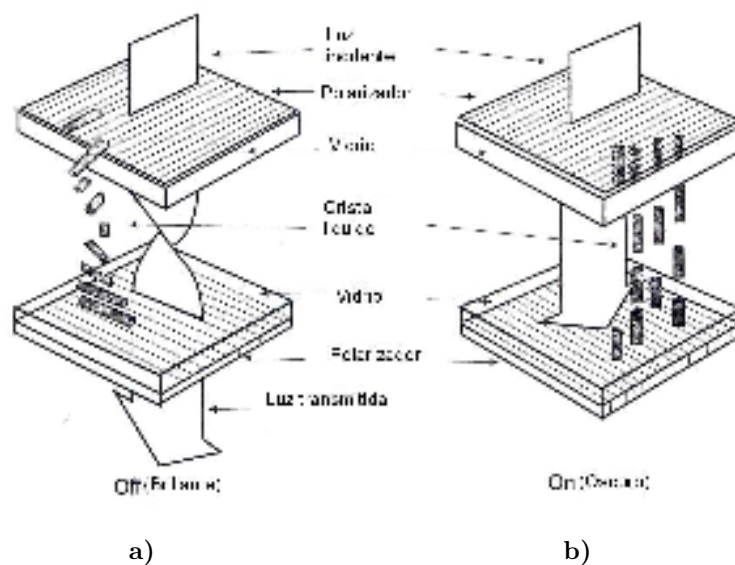


Figura 25. Comportamiento de las moléculas de cristal líquido bajo diferencia de potencial aplicado a) Ausencia de voltaje-Modo OFF (máxima transmitancia). b) Voltaje aplicado- Modo ON (mínima transmitancia).

4.1.2 Adecuación del Panel

Observando el esquema de la sección transversal del interior de una de estas pantallas, Figura 26, el panel de cristal líquido es la parte central del dispositivo, y a los lados aparecen algunos elementos que mejoran las propiedades ópticas del *display*. A la derecha hay un conjunto de películas que evitan reflexiones y mejoran

las características de contraste y brillo, y a la izquierda está el sistema de iluminación que incluye un polarizador de entrada reflectivo.

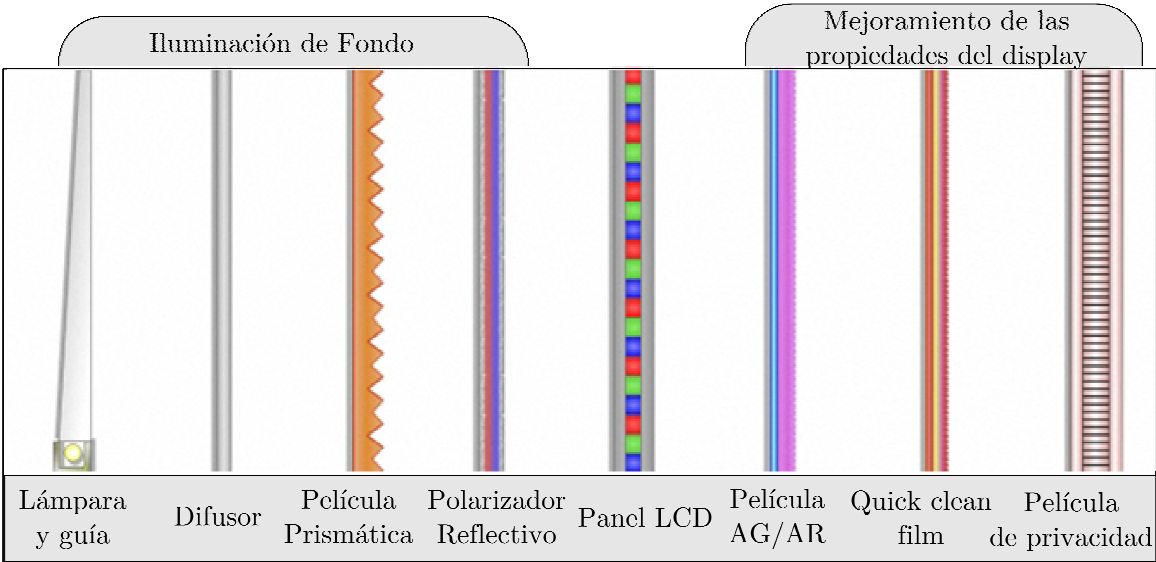


Figura 26. Sección transversal monitor LCD convencional. Tomada de [38].

En el monitor utilizado se retiraron del lado izquierdo los elementos de iluminación, dejando sólo el polarizador que esta adherido al panel. Las componentes del lado derecho vienen adheridas como una sola película, por lo cual también se dejaron.

Se diseñó una montura para el panel que es mostrada en la Figura 27, para que también permitiera colocar el circuito de la señal VGA y en un costado los pulsadores con los controles de contraste, brillo y demás.



Figura 27. Foto modelo en CAD montura para monitor LCD.

El marco para el LCD fue hecho en madera y finalmente se le adicionaron dos bases magnéticas para ser fijado a la mesa óptica. El sistema completo del montaje definitivo de la pantalla y su fuente, se observa en la Figura 28.

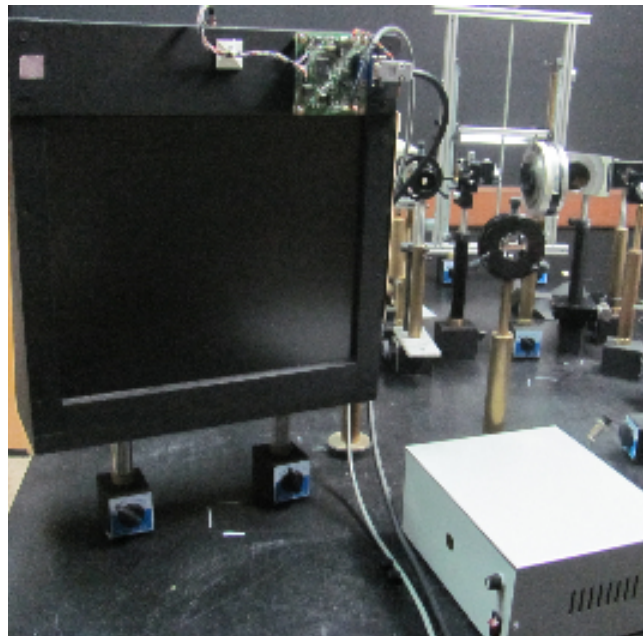


Figura 28. Montaje real del panel LCD en su montura y su fuente de alimentación.

4.2 El difusor

Los montajes para registro de estereogramas holográficos, hacen uso de pantallas difusoras sobre las cuales se proyecta una imagen, proveniente de un LCD iluminado adecuadamente, ver Figura 17, que de acuerdo al ángulo de difusión trata de garantizar una iluminación uniforme de las imágenes proyectadas en el LCD y además que la luz transmitida sensibilice de forma pareja la placa fotosensible; esto tiene efectos en la calidad del resultado final en cuanto a uniformidad en la eficiencia de difracción de la imagen, tiempos de exposición, variación de la pixelación de acuerdo a la posición del difusor en el montaje, ausencia de viñeteo en los resultados, entre otros.

Las superficies difusoras no ofrecen una imagen definida de los objetos, sino que ello depende de cómo distribuyen la luz. Los difusores convencionales tales como vidrio esmerilado o plásticos opacos, logran dispersar la luz incidente en todas direcciones debido a su superficie rugosa Figura 29.

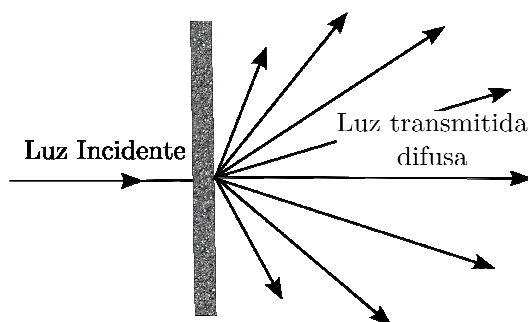


Figura 29. Dispersión de la luz a través de una superficie difusora.

Normalmente la intensidad $I(\theta)$ dispersada por un difusor depende del ángulo de incidencia del rayo con respecto a la normal. En el caso de un difusor lambertiano o difusor perfecto, aunque el ángulo entre la normal y el observador varíe, la radiancia es la misma en todo el plano [39], ver Figura 30.

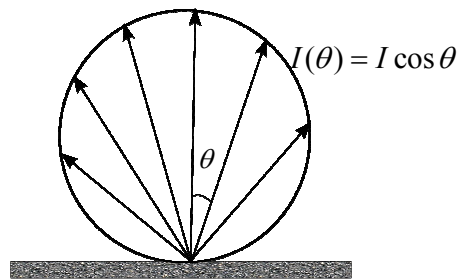


Figura 30. Intensidad dispersada por un difusor lambertiano con un ángulo de difusión θ [39].

Es posible obtener difusores con una distribución angular arbitraria utilizando métodos holográficos para su fabricación; este tipo de difusores tiene la ventaja de que mejora considerablemente el brillo y el contraste de las imágenes, desperdiciando la menor cantidad de luz posible, además de que pueden ser registrados y muy bien comportados en materiales de registro de haluros de plata [13]. Sin embargo, no está dentro de las intenciones del proyecto focalizarnos en obtener difusores con características particulares.

El sistema implementado establece una diferencia con respecto a la forma como usualmente se utilizan los LCD en los sistemas reportados en la literatura. Usualmente, como se ve en la Figura 31a, la vista presentada en el LCD es proyectada en la pantalla difusora, utilizando un sistema óptico, siendo esta imagen la que servirá de objeto para el registro del holograma. El tamaño de la

imagen o equivalentemente, del objeto, estará determinado por el sistema óptico y por la distancia entre el LCD y el difusor.

En el sistema propuesto, el arreglo para lograr el mismo resultado es mucho más simplificado y versátil. Como se ve en la Figura 31b, en este caso la luz proveniente del láser ilumina directamente el difusor, en un área correspondiente al tamaño de la vista que se va a holografíar. La luz dispersada por el difusor ilumina directamente el panel LCD, permitiendo que se obtenga directamente la imagen presentada. La idea es que en el panel se vea directamente la imagen, tal como se vería en un monitor, sólo que con la diferencia que no estará iluminada por luz blanca con los colores de la imagen, sino que tendría el color correspondiente a la luz monocromática del láser utilizado, tal como ocurre cuando en holografía convencional se ilumina el objeto con el láser.

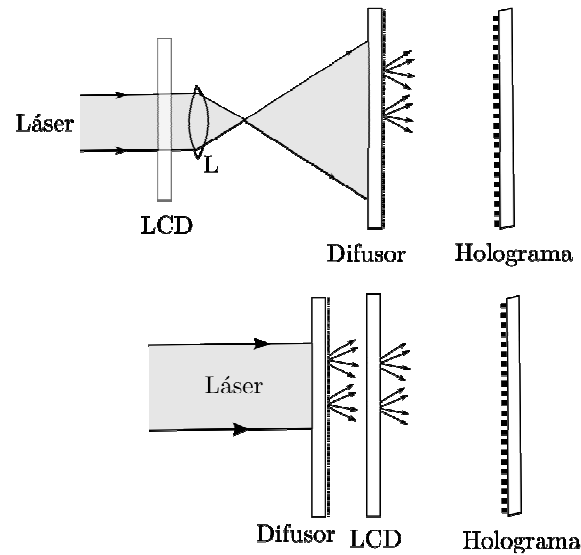


Figura 31. Proyección de imágenes como haz objeto para registro de hologramas a) Utilizando sistema formador de imagen para la proyección sobre un difusor b) Proyección directa sobre el LCD sin usar sistema formador de imagen.

El tamaño de de la vista (objeto) que se quiere holografíar, no depende de ningún sistema óptico, dependerá del tamaño de la imagen que genere el computador y la distancia entre el difusor y el LCD puede ser cero.

Bajo las consideraciones anteriores, sería de esperarse que fuera muy adecuado utilizar el difusor que trae el monitor. Aunque se probaron diferentes difusores, como se verá posteriormente, con el difusor del monitor se obtuvieron los mejores resultados.

4.3 Materiales de Registro

Debido a que se utiliza un laser de baja potencia y teniendo en cuenta que los sistemas LCD por operar por polarización atenúan un porcentaje alto de la luz incidente, se opta por un material que estuviera disponible en el laboratorio y que requiriera bajas exposiciones. Por lo anterior, por su sensibilidad espectral y su proceso de revelado conocido y probado con excelentes resultados bajo las condiciones del laboratorio, se decidió utilizar placas holográficas AGFA-8E75, para los registros de transmisión y plano-imagen de reflexión.

La fotoquímica utilizada para revelar un holograma depende no solo del tipo de registro que se haya realizado sino también del resultado esperado. En el desarrollo de este proyecto se utilizaron los dos procesos convencionales estándar usados para el revelado de esta película:

1. Para hologramas de transmisión: Revelador D-19 + Fijador Kodak F-24.

2. Para hologramas de reflexión: Revelador Pyro + Blanqueador Pyrochrome.

Para algunos registros plano-imagen de reflexión se utilizó película rusa Slavich PFG-03M de grano ultrafino y se reveló con GP-2 y para algunos casos se realizaron registros en película francesa Ultimate U08-M de grano ultrafino, debido a las bajas exposiciones requeridas para sensibilizarla y se reveló con el proceso químico suministrado por el fabricante.

5. Experimentos y Resultados

Para abordar el trabajo experimental se implementó un arreglo lo suficientemente versátil que permitiera el registro de hologramas de transmisión a partir de objetos planos proyectados en un LCD, con una configuración convencional, donde la lente L1 permite colimar el haz de referencia , ver Figura 33. Pero que a su vez pudiera adecuarse para el registro de hologramas de transmisión, para reflexión plano-imagen, y con la adición de un desplazador mecánico, para el registro de estereogramas holográficos centrados en la rendija o en la placa, como se describirá en la sección 5.4. En todos los casos se utilizó un láser de He-Ne de 632,8nm de 20 mW, con una longitud de coherencia aproximada de 40cm y polarizado linealmente.

5.1 Registro de hologramas de transmisión

5.1.2 Montaje

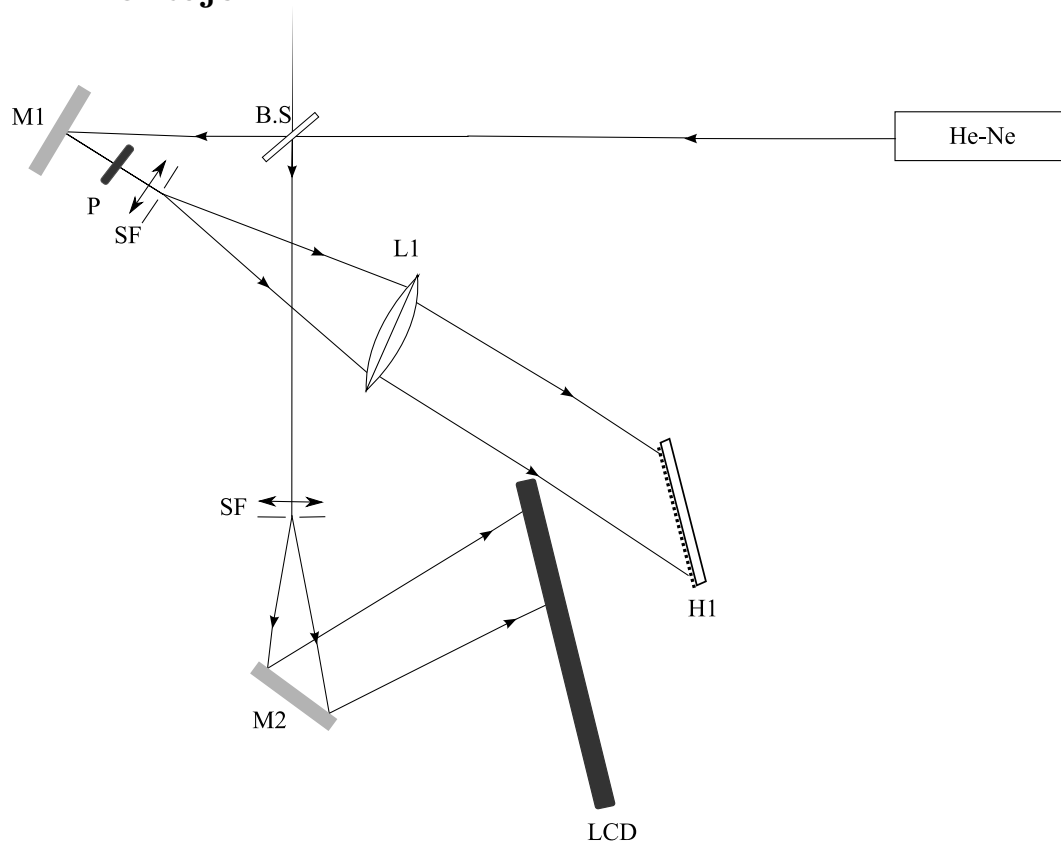


Figura 32. Registro de hologramas de transmisión de objetos planos proyectados en un LCD. M1 y M2: Espejos. BS: Divisor de haz. SF: Filtro Espacial. L1: Lente.

En el montaje de la Figura 32, la lente L1 permite colimar el haz de referencia que ilumina la placa. El haz objeto está polarizado verticalmente (en la dirección que sale del plano del papel/pantalla) e ilumina solo una parte del LCD.

Esta configuración se utilizó con dos propósitos: para el registro de hologramas de transmisión que permitiera determinar las características básicas de funcionamiento del LCD y para hacer mediciones de la polarización en el sistema.

5.1.2 Hologramas de transmisión

Se realizaron registros de transmisión para objetos distintos, en placa AGFA-8E75 de vidrio de 2.5'' x 2.5'', revelada con D-19, utilizando una exposición de $50 \mu J / cm^2$ para todos los casos. Los tiempos de exposición oscilaron entre los 50 y los 273 segundos. Fotografías de algunos de los resultados obtenidos se observan en las Figura 33.

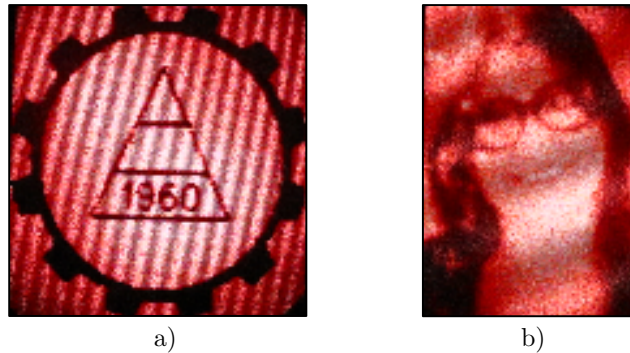


Figura 33. Registro hologramas de transmisión. a) Fotografía de holograma de transmisión, objeto en blanco y negro. b) Fotografía de holograma de transmisión objeto en escala de grises.

Los hologramas fueron reconstruidos con el mismo láser utilizado en el registro. Es importante mencionar que las fotografías tienen características diferentes a las que se observan directamente en el holograma. Mirando directamente el holograma la apariencia moteada debida al speckle es mucho menor y el brillo es más uniforme.

Estos cambios entre lo observado y lo fotografiado son muy notorios, debido a la utilización de un sistema óptico (cámara) cuando se utiliza en la iluminación luz coherente.

Por otro lado, si se mirara con mayor aumento las fotografías, se empieza a observar que la imagen está compuesta de píxeles, como era de esperarse. Pero en la observación directa a distancias convencionales utilizadas en holografía, esto es 40 a 60 cm, la pixelación al ojo desnudo es prácticamente despreciable. Esto se hará evidente cuando estos hologramas sean utilizados como objetos para el registro de hologramas plano-imagen.

Los altos tiempos de exposición utilizados en la obtención de estos resultados, corroboraron la necesidad de realizar medidas para optimizar el desempeño del LCD, para determinar la orientación existente de los polarizadores del LCD y así maximizar la cantidad luz transmitida por el mismo.

5.2 Mediciones de Polarización en el sistema

5.2.1 Ángulos de polarización entrada y salida del LCD

Para tener la máxima intensidad en el haz objeto, es decir la luz que se transmite a través del LCD, se necesita conocer el ángulo del polarizador de entrada. Es por esto que para medir la potencia del haz objeto que incidía sobre el LCD, proveniente del espejo M2 (Figura 32) y garantizar polarización vertical sin

atenuación, se utilizó una placa de $\lambda/2$ con $\theta_{\lambda/2} = 0^\circ$. Se midió en principio la potencia incidente en el LCD, en este caso $I_{\max} = 10,3 \text{ mW/cm}^2$, como se observa en la Figura 34.

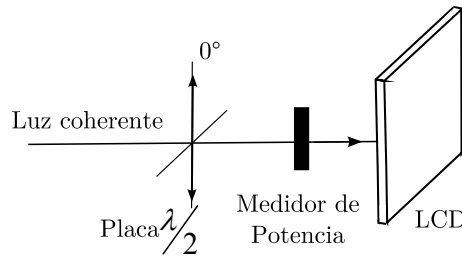


Figura 34. Esquema de medida de potencia incidente al LCD.

Conocida la intensidad incidente en el LCD era posible determinar para que ángulo de entrada se obtenía el máximo valor de la potencia a la salida del sistema. Esto se hizo bajo el modo off y el modo on.

5.2.1.1 Modo OFF

Utilizando la configuración de la Figura 35, se observó que para un ángulo $\theta_{\lambda/2} = 22^\circ$, en la placa de $\lambda/2$ es decir para polarización de 44° , se producía la mayor transmitancia a la salida del LCD.

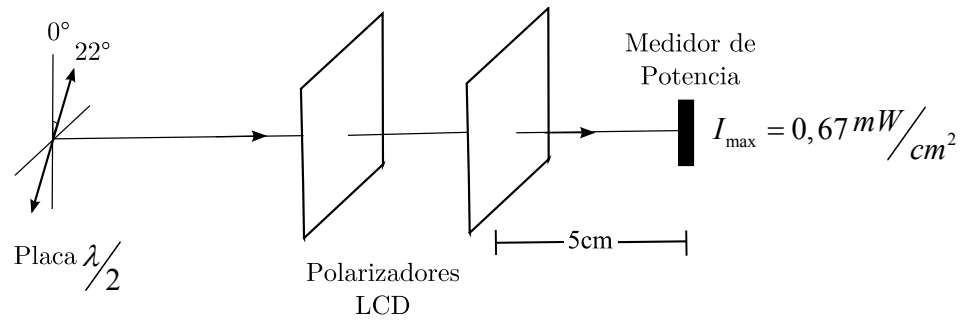


Figura 35. Esquema de medida intensidad máxima a la salida del LCD en modo OFF.

Manteniendo el ángulo de polarización en la placa de $\lambda/2$ de la configuración anterior, se adiciona un polarizador a la salida del LCD y se observa con que ángulo se privilegia la mayor tramitancia. Los resultados se observan en la Figura 36.

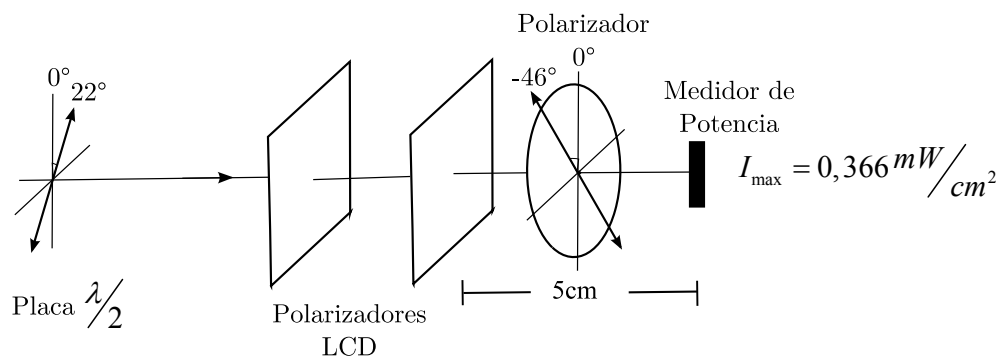


Figura 36. Esquema de medida intensidad máxima con polarizador a la salida del LCD en modo OFF.

5.2.1.1 Modo ON

Teniendo en cuenta que el voltaje aplicado en los electrodos de la celda de cristal líquido tiene una correspondencia directa con el nivel de gris observado en la pantalla, las medidas del modo on se realizaron bajo dos configuraciones; una

utilizando un fondo blanco y otra un fondo negro y se evaluó para ambos casos utilizando un polarizador a las salida del panel, para qué ángulo θ_{pol} se daba la mayor transmitancia. Los resultados se observan en las Figuras 37 y 38. En la configuración modo on con fondo negro, no se utilizó el polarizador externo ya que la atenuación era completa para cualquier caso.

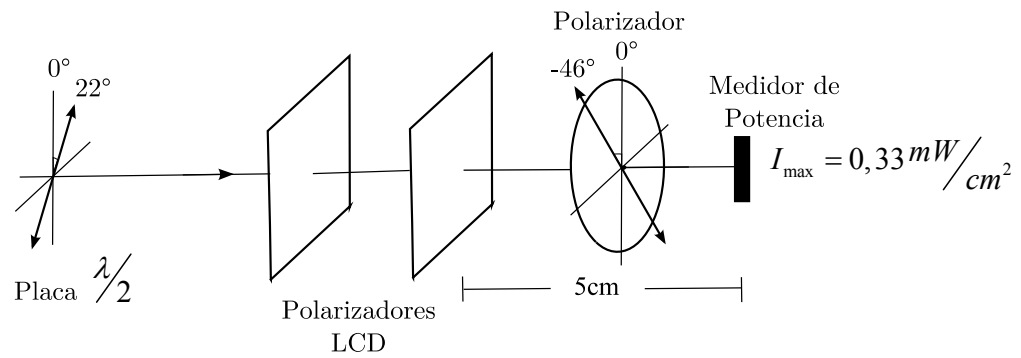


Figura 37. Esquema de medida intensidad máxima con polarizador a la salida del LCD en modo ON y con fondo blanco.

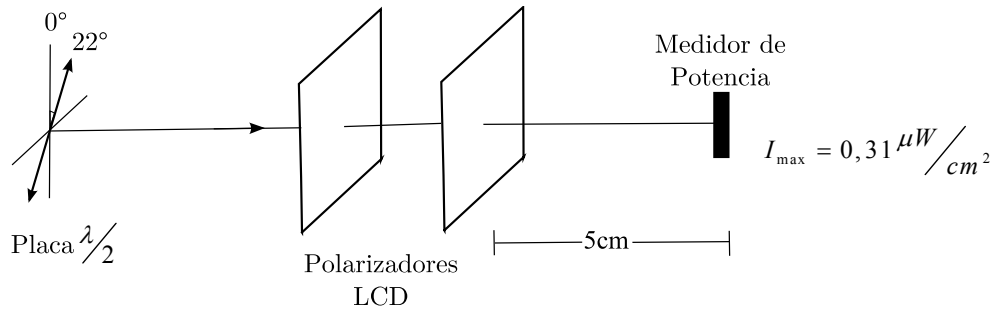


Figura 38. Esquema de medida intensidad máxima a la salida del LCD en modo ON y con fondo negro.

Este tipo de paneles LCD usualmente se encuentra entre dos polarizadores lineales rotados incluso hasta los 90° . En este caso, de manera experimental se encontró que estos polarizadores están cruzados 90° como era de esperarse y su orientación es la

mostrada en la Figura 39. Recordando que la rotación del eje de polarización en una placa retardadora de $\lambda/2$, corresponde al doble del ángulo medido.

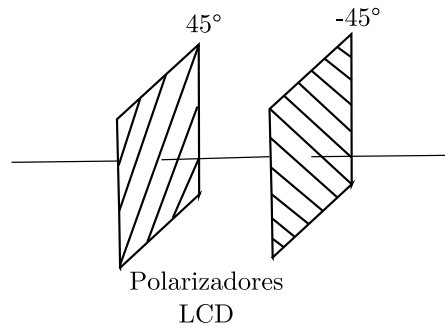


Figura 39. Configuración polarizadores entrada y salida LCD

5.2.2 Polarización del Difusor

Se determinó que el difusor tomado del sistema original de iluminación del monitor, utilizado en el sistema propuesto, también es un elemento óptico que afecta la polarización. Este difusor presenta una superficie áspera y otra más lisa, de manera que fue necesario determinar la orientación de la superficie que debe ir hacia el panel, de modo que la dirección de polarización del difusor se acoplara a la del polarizador de entrada del LCD.

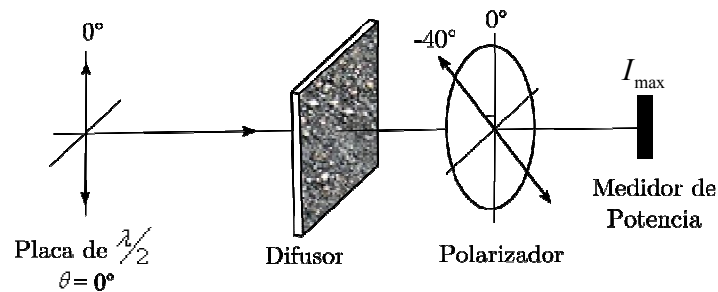


Figura 40. Difusor con superficie áspera del lado del medidor.

Con la configuración de la Figura 40, se midió la máxima intensidad a la salida del difusor a un ángulo de -40° , caso contrario a lo observado cuando se realizó la medida con el lado liso del difusor hacia el medidor como se observa en la Figura 41, donde la dirección privilegiada es para un ángulo de 40° . Los anteriores resultados confirman que al cambiar el lado del difusor, la dirección de polarización de la luz dispersada, se invierte.

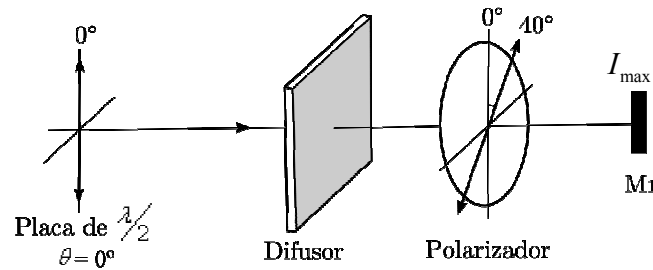


Figura 41. Difusor con superficie lisa del lado del medidor.

Considerando que el ángulo del polarizador de entrada del LCD es de 45° , resulta coherente colocar el difusor con el lado liso del lado del panel de modo tal que el difusor privilegie la dirección del polarizador de entrada. Así, la configuración definitiva del sistema difusor-polarizador-LCD-polarizador se observa en la Figura 42.

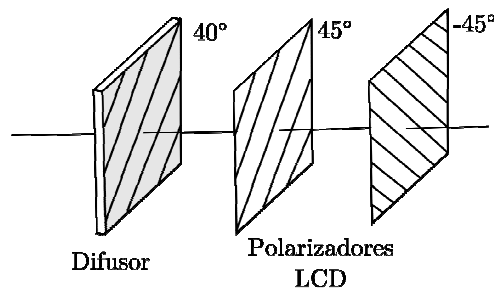


Figura 42. Configuración final difusor-polarizadores LCD.

5.2.2 Polarización en el montaje

Del resultado anterior resulta claro que para obtener la máxima intensidad transmitida por el sistema completo, o equivalentemente, para obtener la mayor intensidad en el haz objeto, el difusor debe ser iluminado con un ángulo de 40° .

Para esto hay tres posibilidades:

- Colocar una placa de lambda medios en el haz objeto.
- Colocar un polarizador en el haz objeto.
- Rotar el láser.

La intensidad I a la salida del sistema iluminado con un láser de 20mW de 632,8nm con la polarización vertical es de $I = 7,6 \mu W / cm^2$. Se realizan medidas para las tres opciones anteriores con el LCD en modo off y con el difusor y se contrastan los resultados en la Tabla 1.

	Ángulo ($^\circ$) de rotación	$I_{\max} (\mu W / cm^2)$
Láser con polarización vertical	0	7,6
Con placa $\lambda/2$	20°	17
Con polarizador	40°	4,8
Rotando el Láser	40°	12,7

Tabla 1. Medidas de Intensidad máxima a la salida del LCD.

Así que para obtener la máxima intensidad transmitida del sistema, se utilizó una placa de $\lambda/2$ antes de expandir el haz objeto. También resultaba importante considerar la dirección de polarización del haz de referencia en la placa holográfica. Y dado que el haz objeto que incide en la placa tiene un estado de polarización muy bien determinado por el sistema LCD (a diferencia de los objetos difusos que tienden a despolarizar la luz), la máxima visibilidad en las franjas registradas se obtiene cuando la dirección de polarización del haz de referencia tiene el mismo ángulo. Esto se logra ubicando un polarizador a 45° antes expandir el haz de referencia.

Estas consideraciones aplican para el registro de la matriz de transmisión a partir de objetos planos proyectados en el LCD adecuado para este trabajo.

5.3 Registro de Hologramas Plano-Imagen

5.3.1 Montaje

Como se mencionó anteriormente, el montaje de la Figura 32, es parte de un arreglo más general; el que sirve para varias configuraciones sin hacer modificaciones. El montaje propuesto, observado en la Figuras 43 y 44, se compone esencialmente de dos etapas; una de ellas que corresponde al registro de matrices y otra para el registro de hologramas de reflexión plano-imagen. Esto permite de manera sistemática y rápida registrar matrices y evaluar sus resultados

en reflexión, además se optimiza el espacio de la mesa de trabajo y se aprovecha la disponibilidad del equipo.

Utilizando un láser de 632.8nm de 20mW, con polarización vertical, rotando el haz objeto con una placa de $\lambda/2$ con $\theta_{\lambda/2} = 20^\circ$ en sentido horario y con un polarizador P a 45° en el haz de referencia para la configuración de transmisión, se realizó el registro de matrices a partir de la proyección de objetos planos en el LCD, buscándose maximizar la visibilidad de las franjas de interferencia y la transmitancia del sistema bajo las condiciones existentes, en concordancia con los resultados anteriores.

Para el registro de las matrices de transmisión, se utilizó un haz de referencia colimado por L1, esto permite que para la reconstrucción de la imagen real del H1 sin distorsiones ni magnificaciones, que servirá de haz objeto para la configuración de plano-imagen, baste con rotar la placa H1, 180° .

El divisor de haz BS1, es el elemento que habilita la configuración de reflexión. La pareja P12 corresponde a un par de polarizadores cruzados que cumplen la función de atenuación para ajustar la relación referencia objeto en el registro del plano-imagen, ya que el segundo polarizador es fijo, permite conservar la dirección de polarización y únicamente cambiando la dirección de polarización del primero se da la atenuación en el haz de referencia. H1 es la placa correspondiente al registro del holograma de transmisión, la cual se ilumina con un haz colimado por la lente L1. Rotando H1, este también puede operar como matriz para registrar en H2, hologramas plano-imagen de reflexión.

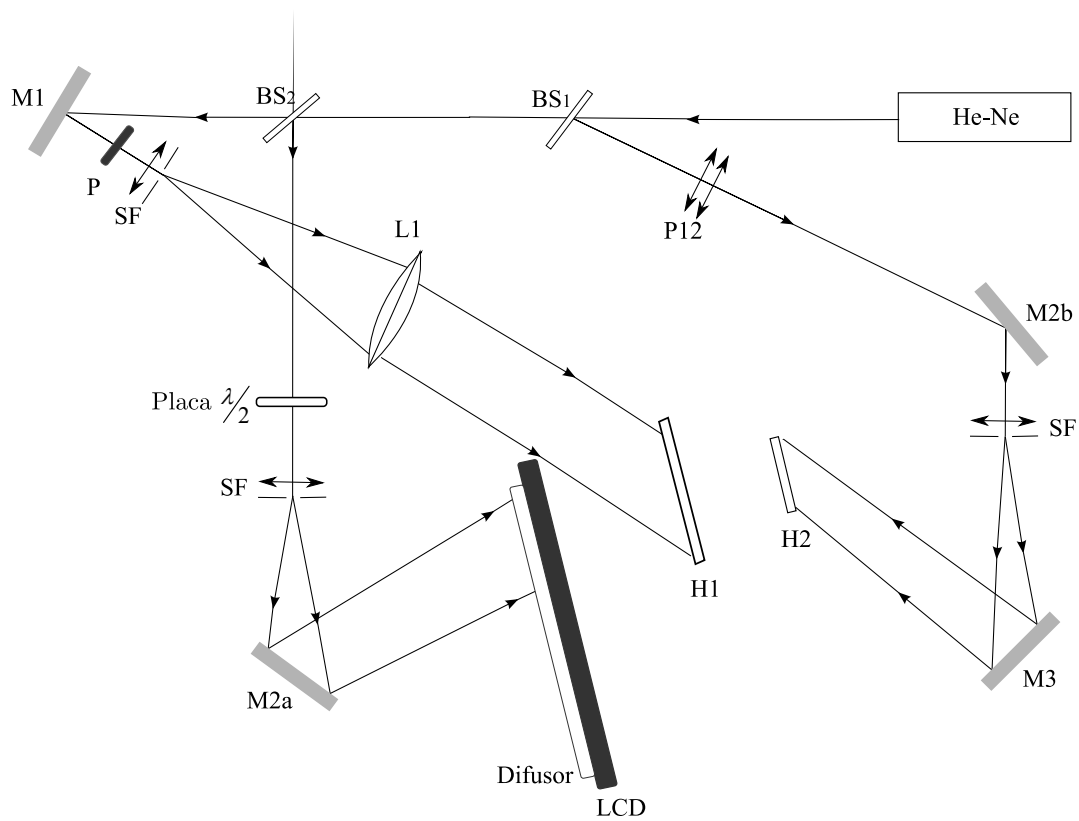


Figura 43. Montaje general para registro de matrices y hologramas plano-imagen. M1, M2a, M2b y M3: Espejos. S.F: Filtro Espacial. BS1 y BS2: Divisores de haz. L1: Lente. P: Polarizador. P12: Polarizadores cruzados. H1 y H2: Placas holográficas.

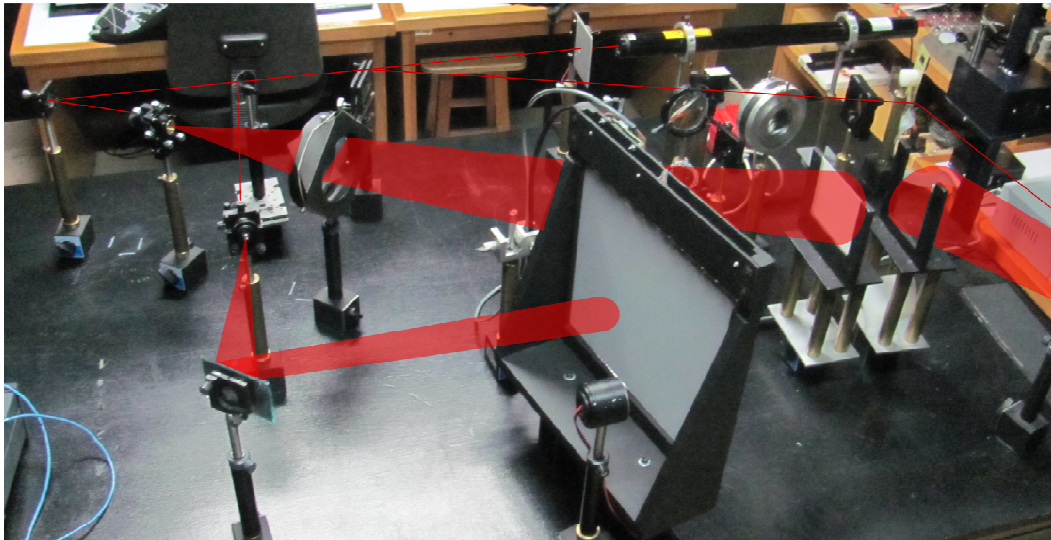


Figura 44. Fotografía montaje real versátil para registro de matrices y hologramas plano-imagen.

5.3.1 Ubicación de las Imágenes en el LCD

Como resultado final del proceso de segunda generación, se espera que el H2 al ser iluminado con luz blanca reconstruya una imagen real o virtual ortoscópica derecha, esto dependerá particularmente de la geometría del montaje, la orientación de las imágenes en el LCD, la separación entre el H1 y el H2, la orientación de la emulsión en el registro, entre otros.

5.3.1.1 Registro de la matriz (H1)

Bajo las condiciones del montaje, se determinó la orientación que debían tener las imágenes presentadas en el LCD, partiendo de la Figura 45, donde, para el registro de la matriz incide el haz de referencia que en este caso es un frente de onda plano y el haz objeto que constituye la imagen en el LCD y en la Figura 46 iluminando el H1 con el haz conjugado de R1, se reconstruye una imagen virtual ortoscópica derecha (I.V.O.D) del objeto y al girar 180° la película e iluminando con R1, se reconstruye una imagen real pseudoscópica invertida (I.R.P.I) del objeto y este último constituye ahora el haz objeto para el registro del H2 como se observa en la Figura 47.

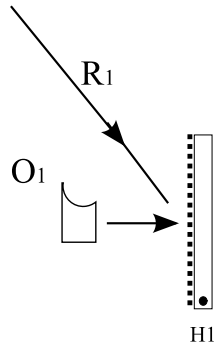


Figura 45. Registro del H1

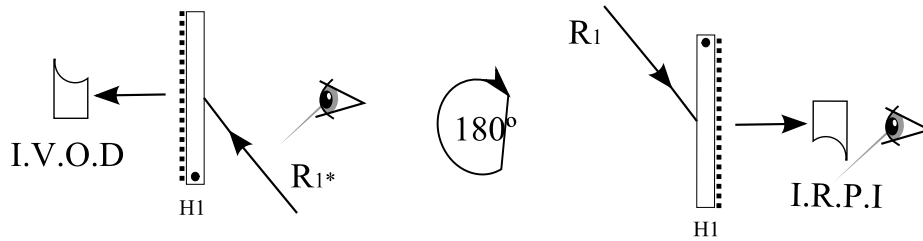


Figura 46. Reconstrucción de la matriz H1

5.3.1.2 Registro del holograma plano-imagen (H2)

Teniendo en cuenta que el haz de referencia para H1 es un haz colimado, es de esperarse que la imagen O_2 se forme justo a la distancia que había entre el LCD y la placa de registro H1. De este modo, H2 puede ser ubicada después como en la Figura 47a o antes como en la Figura 47b de donde convergen los rayos que forman el objeto O_2 .

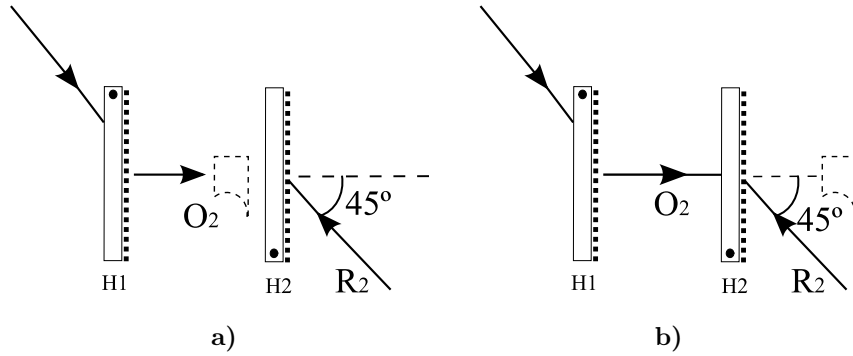


Figura 47. Registro del H2 a). Con $\overline{H1H2} > \overline{LCDH1}$ b). Con $\overline{H1H2} < \overline{LCDH1}$

En ambos casos se obtienen imágenes ortoscópicas como se observa en la Figura 48, sin embargo, la imagen será virtual o real dependiendo de la condición que cumpla la separación $\overline{H1H2}$ en el registro.

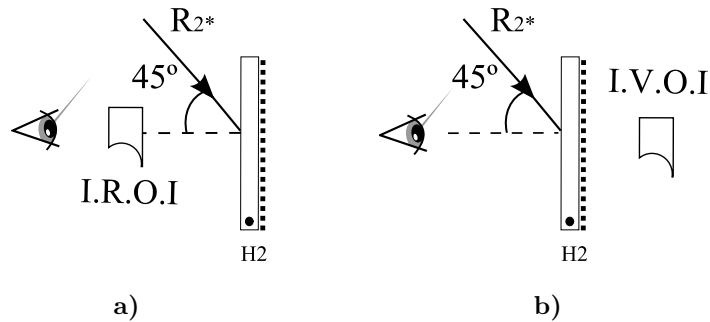


Figura 48. Visualización del H2 a). Para un H2 con $\overline{H1H2} > \overline{LCDH1}$ b). Para un H2 con $\overline{H1H2} < \overline{LCDH1}$

Obsérvese que en ambos casos se obtienen imágenes invertidas con respecto a la orientación de la imagen inicial en el LCD, así que a partir de este razonamiento se decidió rotar la imagen 180° con respecto a la hipótesis inicial observada en la Figura 45.

5.3.2 Matrices y hologramas plano-imagen de reflexión

Los resultados anteriores sirvieron para registrar matrices de transmisión y a partir de estas registrar hologramas plano-imagen con el arreglo experimental de la Figura 43. Por simplicidad y para evaluar las características del holograma plano-imagen de reflexión se utilizó un objeto contrastado, además se tuvo en cuenta las consideraciones en la orientación del objeto en el LCD presentadas en la sección anterior.

La matriz fue registrada en película AGFA-8E75 de 4''x5'' utilizando una exposición de $50 \mu J/cm^2$ y revelada con D-19. Una fotografía de la reconstrucción de la imagen del objeto se observa en la Figura 49.



Figura 49. Fotografía de la reconstrucción de la imagen virtual ortoscópica para el registro de la matriz H1 en AGFA8E75

Utilizando la matriz H1 de la Figura 49 se realizaron registros plano-imagen en película PFG-03M reveladas con GP-2, de formato 2.5''x2.5'' utilizando exposiciones del orden de los $1800 \mu J/cm^2$ y con unos tiempos de exposición entre

los 70 y 75 segundos. Una fotografía de los resultados obtenidos se observa en la Figura 50.

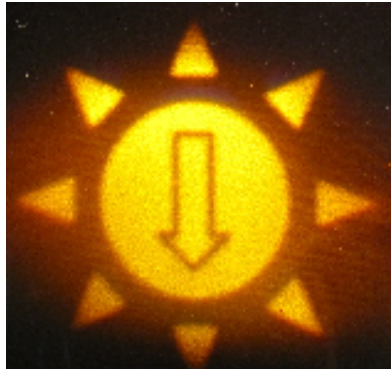


Figura 50. Fotografía de la reconstrucción con luz blanca del holograma plano-imagen H2, en PFG-03M.

En este resultado es apreciable cómo desaparece la pixelación que aparecía en la matriz y además puede notarse que el speckle presente en la matriz no degrada la calidad del registro de H2. El resultado es eficiente y tiene características muy similares a las que pueden obtenerse del registro de una matriz generada a partir de un objeto real.

5.4 Registro de Estereogramas Holográficos

5.4.1 Arreglo Experimental

En el montaje de la Figura 43 se incorporó el sistema de la rendija, para adecuarlo al registro de matrices de estereogramas holográficos de dos tipos: centrados en la rendija y centrados en la placa. El montaje definitivo se observa en la Figura 51.

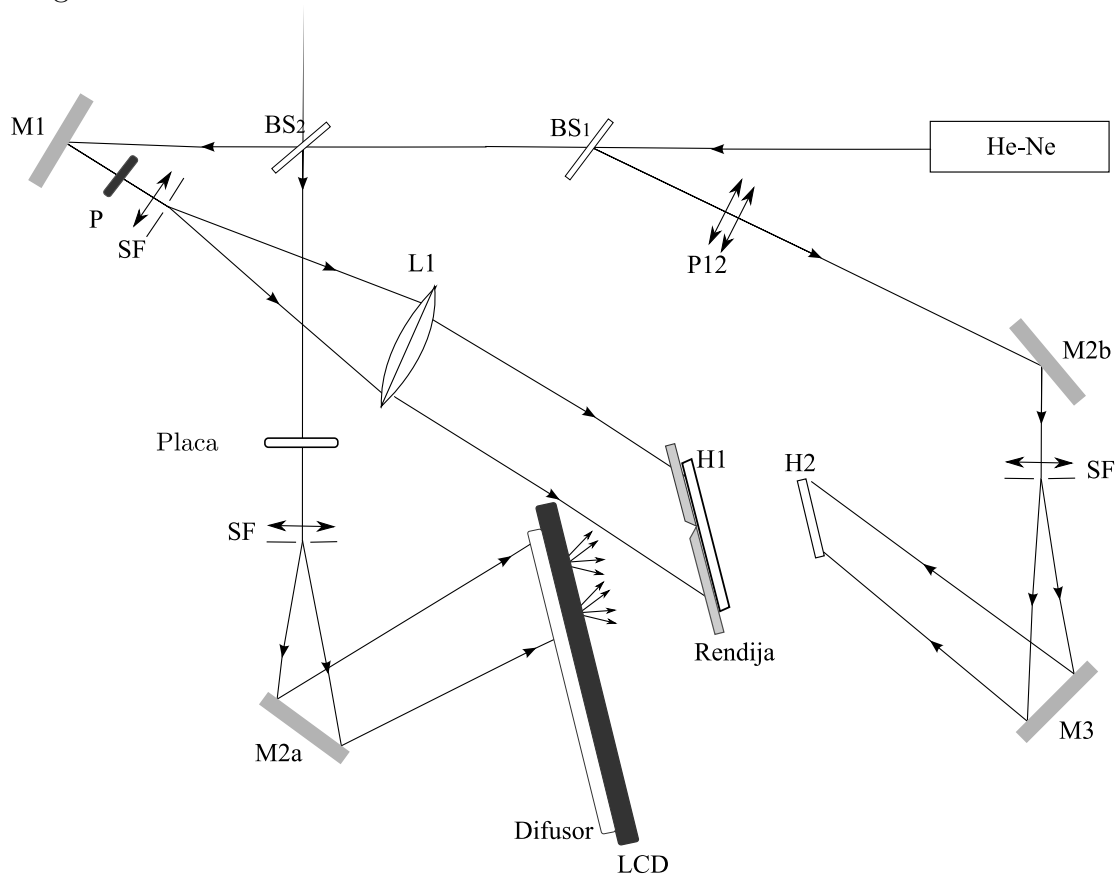


Figura 51. Montaje general para registro de matrices para estereogramas holográficos y plano-imagen de reflexión. M1, M2a, M2b y M3: Espejos. S.F: Filtro Espacial. BS1 y BS2: Divisores de haz. L1: Lente. P: Polarizador. P12: Polarizadores cruzados. H1 y H2: Placas holográficas.

En ambos casos se utilizó el software Pro-Engineer 5 para el modelo en CAD del objeto a registrar y a partir de allí se generó un video con un determinado campo de visión para cada uno y se obtuvo el conjunto de fotogramas requerido de acuerdo al ancho de rendija que se seleccionó. Una secuencia de solo 6 de los fotogramas para uno de los objetos utilizado se muestra en la Figura 52.

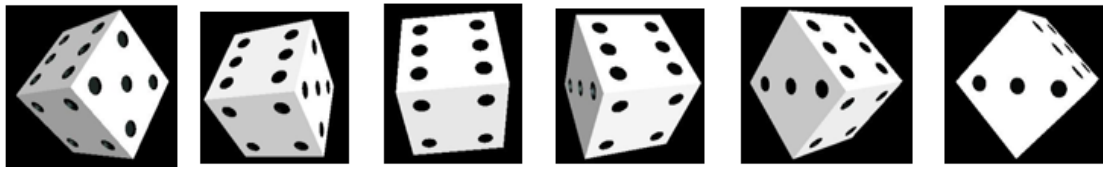


Figura 52. Secuencia de 6 fotogramas para un dado con rotación en el eje y.

5.4.1.1 Centrados en la Rendija

La configuración experimental para el registro de este tipo de estereogramas holográficos se observa en la Figura 53. Como se observa, esta configuración utiliza una rendija fija y una placa móvil, ambos fueron diseñados, construidos e implementados en un sistema funcional. Fotografías de este sistema se observan en las Figuras 54-56.

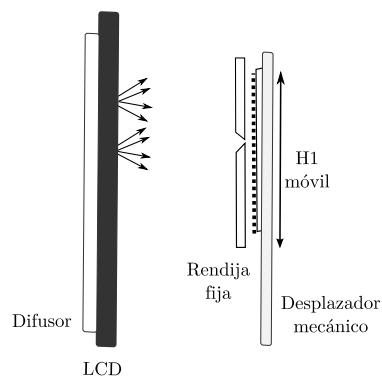
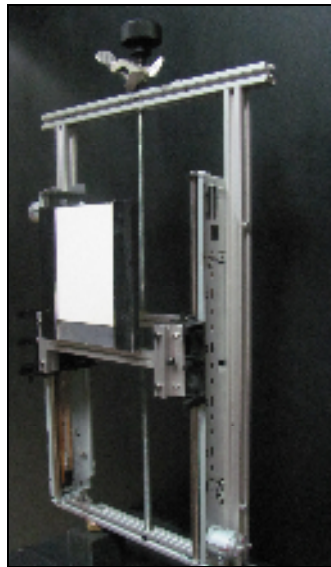


Figura 53. Configuración para el registro de estereogramas holográficos centrados en la rendija. El elemento móvil es el desplazador mecánico donde se encuentra sujeto el porta placas.

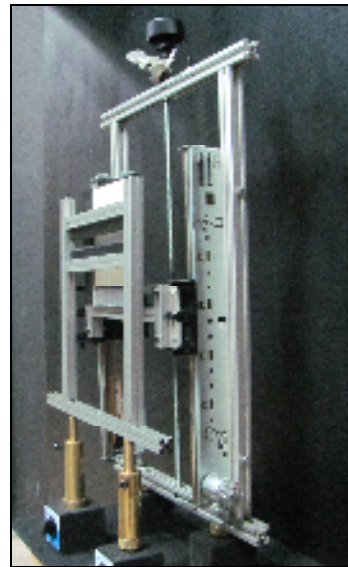


Figura 54. Fotografía rendija fija.

En la Figura 55, se observa que el porta placas se encuentra apoyado en dos rieles paralelos y el desplazamiento se realiza de manera manual utilizando un tornillo sin fin. Una fotografía del sistema completo rendija-portaplacas se observa en la Figura 55b.



a).



b).

Figura 55. Fotografías sistema implementado para el registro de matrices de estereogramas holográficos con solo paralaje horizontal centrados en la rendija. a). Porta placas móvil. b). Sistema completo rendija fija-porta placas móvil.

El sistema completo LCD-rendija-portaplacas que permitió el registro de estereogramas holográficos centrados en la rendija se observa en la Figura 56. Este tipo de configuración impone una restricción sobre el tamaño de la placa de registro del H2, debido a que las imágenes de las rendijas aparecen ubicadas justo en frente de la rendija (ver Figura 10) y por ende, distribuidas sobre toda el área de la película H1, entonces la placa H2 debe ser como mínimo del mismo tamaño que H1, de lo contrario se perdería información.

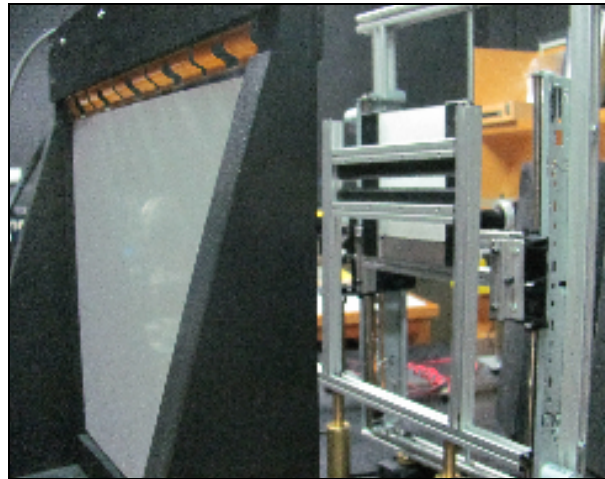


Figura 56. Fotografía del montaje experimental LCD-rendija-porta placas móvil, para estereogramas centrados en la rendija.

5.4.1.2 Centrados en la Placa H1

La configuración para el registro de estereogramas holográficos centrados en la placa se observa en la Figura 57.

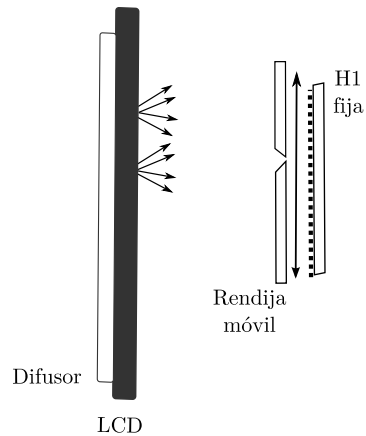


Figura 57. Configuración para el registro de estereogramas holográficos centrados en la placa. El elemento móvil es el desplazador mecánico donde está sujeta la rendija.

El sistema de desplazamiento del porta placas utilizado para matrices de estereogramas centrados en la rendija, se adecuó de forma tal para que fuera versátil y funcional para desplazar la rendija también como se observa en la Figura 58a. Este sistema fue diseñado, construido e implementado para acoplarse al montaje óptico con un porta placas fijo como se observa en la Figura 58b.

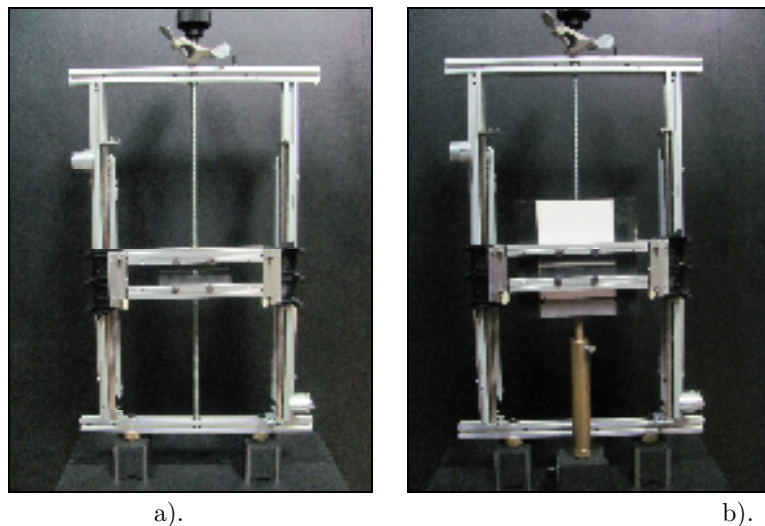


Figura 58. Fotografías sistema implementado para el registro de matrices de estereogramas holográficos con solo paralaje horizontal centrado en la placa. a). Rendija móvil. b). Sistema completo rendija móvil-porta placas fijo.

El sistema completo permitió el registro de estereogramas holográficos centrados con respecto a la rendija. En este tipo de configuración se realizaron medidas de relación referencia/objeto sobre toda el área de la placa, y se establecieron tiempos de exposición variables para conservar la densidad uniforme en los registros.

Debido a la forma como se reconstruyen las imágenes reales en el H1 bajo esta configuración (Figura 11), es posible utilizar una placa H2 de menor tamaño que la de la matriz, conservando el área del tamaño del objeto.

5.4.2 Estereogramas Holográficos

Se realizaron registros para matrices de estereogramas holográficos y plano-imagen de reflexión utilizando el arreglo experimental propuesto en la Figura 51 y bajo las configuraciones presentadas en las Figuras 53 y 57.

Todas las matrices de estereogramas holográficos fueron registradas en placa AGFA-8E75 de 4"x5" y reveladas con D-19, utilizando objetos modelados por computador, considerando diferentes ángulos de visión, variaciones en el tamaño de la rendija y por ende distinto número de cuadros. Estas fueron registradas bajo dos configuraciones: centradas en la rendija, utilizando un porta placas móvil y una rendija fija y centradas en la placa, utilizando una rendija móvil y un porta-placas fijo.

5.4.2.1 Matrices para estereogramas centrados en la rendija

Utilizando la configuración de la Figura 53, se registró una matriz de transmisión de un objeto simétrico, conocido y altamente contrastado, que permitiera detectar con facilidad las distorsiones en el resultado. Así que se optó por un dado blanco con puntos negros; se seleccionó un ángulo de visión de 150° y un tamaño de rendija de 4mm considerando que el tamaño de la pupila del ojo humano tiene un tamaño que oscila entre 3-4mm.

El video de 150° de visión del cubo fue discretizado en 32 fotogramas teniendo en cuenta el tamaño de la placa fotosensible, con lo cual la separación angular entre cuadros era de 4.7° .

De acuerdo a la configuración utilizada, el porta placas era el elemento móvil, así que el haz de referencia permanecía fijo iluminando una pequeña franja donde estaba ubicada la rendija, así que variaciones en la relación referencia-objeto eran debidas a variaciones del contraste del haz objeto entre cuadro y cuadro, el cual no era notorio en este caso, por lo cual, los tiempos de exposición utilizados fueron constantes.

El resultado en la densidad y en la eficiencia de difracción fue muy uniforme entre cuadros, las rendijas quedaron equiespaciadas, aunque entre ellas hubo discontinuidades apreciables constantes en el registro completo como se observa en la Figura 59.



Figura 59. Fotografía reconstrucción de imagen virtual para matriz de estereograma holográfico centrado en la rendija.

En la foto solo son apreciables algunos de los fotogramas. El objeto se ve extendido debido a que, cada rendija tiene al frente el objeto con perspectiva correspondiente al fotograma.

5.4.2.2 Holograma plano-imagen a partir de matriz centrada en la rendija.

Rotando el H1 180° en el montaje de la Figura 51, habilitando la configuración de reflexión mediante BS1, y utilizando las imágenes reales superpuestas sobre H2, se registra un holograma plano-imagen de reflexión en película AGFA-8E75 de 4''X5'', revelada con pyrogallol. Varias fotografías tomadas desde diferentes posiciones angulares del observador muestran el resultado en la Figura 60.

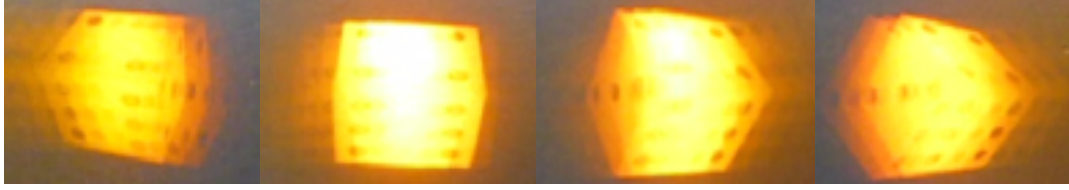


Figura 60. Fotografías de la reconstrucción del registro plano-imagen a partir de la matriz de la Figura 59 tomadas desde diferentes posiciones angulares del observador.

Debido a que cada una de las imágenes se reconstruye al frente de la rendija en la que fue registrada dicha perspectiva, el observador requiere dirigir la vista al infinito para recomponer las imágenes en 3D como se observa en la Figura 61, lo cual hace muy incómodo la visualización de este tipo de estereogramas. Sumado a lo anterior, los problemas de *cross-talk* son muy notorios debido a que los pares estereoscópicos no se superponen en una misma región espacial, así que es posible estar viendo varias parejas al mismo tiempo, lo cual se traduce en una pérdida de contraste de las imágenes y en la aparición de imágenes fantasma.

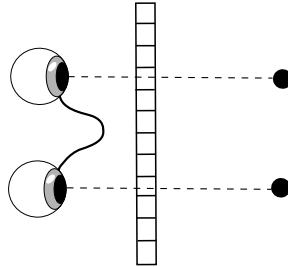


Figura 61. Visualización de estereogramas holográficos centrados en la rendija.

Por otro lado, la forma en que se reconstruyen las imágenes en este caso, impide utilizar un tamaño de placa H2 inferior a la del H1, porque las imágenes reales no aparecen superpuestas en una misma región espacial, sino que aparecen distribuidas sobre un área igual a la utilizada para hacer el registro de la matriz inicial. Esto

tiene un efecto notorio en el resultado final y es que además de que el objeto rote sobre su propio eje mostrando el paralaje esperado, adicionalmente se traslade sobre la placa como se observa en la Figura 60.

Considerando la posición en la que se debe ubicar el observador y que los pares estereoscópicos se forman a partir de las vistas que estén separadas longitudinalmente la distancia intraocular, aproximadamente entre 6-7cm, en este registro se utilizó un ángulo de visión muy grande, por lo tanto, en la reconstrucción del H2 con luz blanca se observaron distorsiones debido a los pares que se forman, ya que estos no recomponían el objeto de manera real.

5.4.2.2 Matrices para estereogramas centrados en la placa

Con la intención de obtener resultados con mayor comodidad en su visualización, se realizaron matrices para estereogramas centrados en la placa; basados en la configuración de la Figura 57, se registraron matrices de transmisión de objetos altamente contrastados para utilizar los menores tiempos de exposición posibles, ya que los tiempos de registro de una matriz completa superan las 3 horas.

En principio, se utilizó el mismo objeto (dado) bajo las mismas condiciones de la matriz con las imágenes centradas en la rendija pero bajo una nueva configuración, en donde el porta placas está fijo y la rendija es móvil con el fin de hacer comparaciones únicamente debidas a las variaciones en el montaje.

Se registró una nueva matriz a partir del mismo objeto con 4.7° de separación entre cuadros, utilizando de igual forma un tamaño de rendija de 4mm pero el registro se hizo bajo la configuración de imágenes centradas con respecto a la placa.

El desplazamiento de la rendija implica variaciones en la relación referencia-objeto, debido a que la lente colimadora de la que se dispone no es lo suficientemente grande como para iluminar el área de la placa completa de manera uniforme, y la intensidad decae notoriamente hacia los extremos, de igual manera la luz difusa proveniente del haz objeto, no alcanza a iluminar de manera uniforme los extremos superior e inferior de la placa holográfica.

Como solución, se hicieron medidas de potencia sobre distintas regiones del área donde iban a interferir ambos haces, se tuvo en cuenta las relaciones referencia-objeto variables y en consecuencia se establecieron tiempos de exposición igualmente variables considerando la misma exposición para todos los cuadros, con el fin de obtener la densidad más pareja posible.

Como resultado, se obtuvieron imágenes con eficiencias de difracción muy similares entre ellas, por otro lado, las imágenes reales a diferencia del caso anterior, convergen en la misma área, con lo cual la única restricción para escoger el tamaño de la placa H2 es el tamaño del objeto mismo.

A partir de esta matriz se hicieron registros plano-imagen de reflexión en AGFA-8E75 de $2.5'' \times 2.5''$, revelados con pyrogallol, fotografías de este resultado visto

desde diferentes posiciones angulares se muestran en la Figura 62. El resultado muestra diferencias completamente notorias con respecto al de la Figura 60. En este caso se reconstruye un par estereoscópico a la vez, el objeto no se traslada sobre la placa sino que se observa el paralaje horizontal esperado únicamente. Y debido a que las vistas que componen el par estereoscópico convergen en la misma posición espacial de acuerdo a la Figura 11, la reconstrucción de las imágenes 3D resulta ser bastante cómoda y de la forma en que se muestra en la Figura 63.

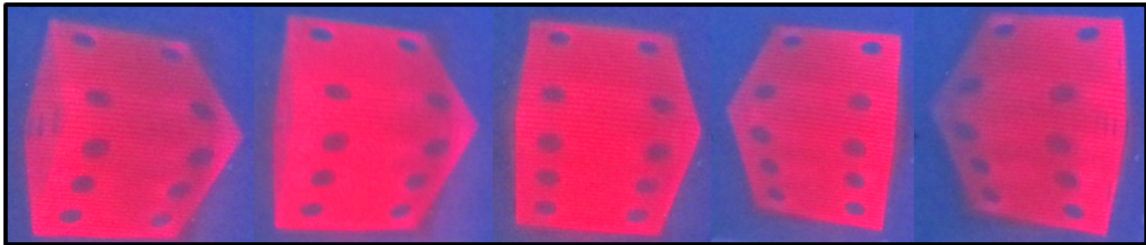


Figura 62. Fotografías de la reconstrucción del registro plano-imagen a partir de la matriz de la para objeto centrada en la placa, tomadas desde diferentes posiciones angulares del observador.

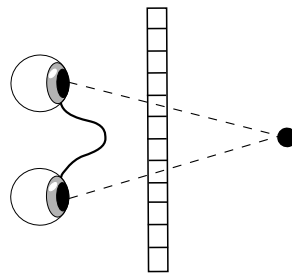


Figura 63. Visualización de estereogramas holográficos centrados en la placa.

Para que la intensidad del haz objeto fuera mucho más uniforme sobre el área de la placa se hicieron medidas de potencia en la posición del H1 utilizando diferentes difusores a la salida del LCD. El mayor ángulo de difusión estaba dado por el difusor extraído de la pantalla del LCD, así que se cambió de posición el difusor

como se observa en Figura 64, y se hizo una nueva matriz, utilizando el mismo objeto pero con un tamaño de rendija de 3mm, 70° grados de visión del CAD y se registraron 30 cuadros, con lo cual la separación angular entre uno y otro fue de 2.33°.

En el resultado del plano-imagen utilizando esta nueva matriz se observa mayor continuidad en las imágenes como era de esperarse. Una fotografía del resultado se observa en la Figura 65.

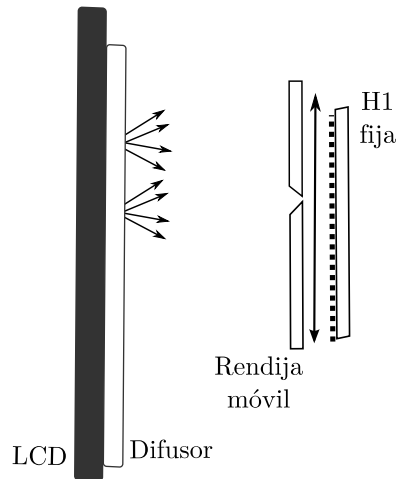


Figura 64. Configuración para el registro de estereogramas holográficos centrados en la placa, utilizando un difusor a la salida del LCD para hacer más uniforme el haz objeto.



Figura 65. Fotografía de la reconstrucción del registro plano-imagen a partir de la matriz utilizando la configuración de la Figura 64.

6. Conclusiones

En el desarrollo de este trabajo se propuso y se implementó un método simplificado y versátil para generar imágenes planas, adecuando un modulador LCD de bajo costo obtenido de un monitor de computador, que permite la proyección de las imágenes en tamaño real, para que operen como objetos que posibilitan el registro de hologramas y de manera directa, sin la necesidad de elementos ópticos adicionales para la formación de imágenes sobre un difusor.

Se realizaron medidas para mejorar el desempeño del LCD. Para esto se determinó la orientación existente entre los polarizadores del mismo y se midieron los ángulos de la dirección de polarización adecuados para el haz objeto y haz de referencia que permitieran maximizar la cantidad de luz transmitida por el LCD y aumentar la visibilidad del sistema de franjas registrado.

El sistema implementado posibilitó arreglos experimentales que permiten el registro de hologramas de transmisión de objetos planos generados computacionalmente; con buena eficiencia de difracción, registrados en materiales de haluros de plata. También se implementó un sistema óptico versátil para el registro de matrices para hologramas plano-imagen de reflexión y matrices de transmisión multiplexadas espacialmente usadas para el registro de estereogramas plano-imagen.

Se diseñó y construyó un desplazador mecánico versátil, adecuado para el desplazamiento de la rendija en algunos casos o el porta placas en otros, lo cual permitió el registro de vistas de manera selectiva sobre la película.

Se obtuvieron matrices para estereogramas holográficos con densidad uniforme entre rendijas, lo cual permitió uniformidad en la eficiencia de difracción del resultado final, a pesar de los tiempos de exposición variables utilizados, debidos a la relación referencia-objeto variable en el registro de matrices de estereogramas mediante la configuración de vistas centradas con respecto a la placa.

Finalmente, como resultado del trabajo, en el Laboratorio de Óptica de la Universidad EAFIT se cuenta con un sistema completo, que permite el registro de matrices de transmisión, a partir de las cuales se pueden obtener estereogramas holográficos plano-imagen de reflexión, partiendo de un sistema LCD de muy bajo costo, que puede operar en condiciones convencionales con láseres de baja potencia y que permite arreglos experimentales mucho más simplificados que los que usualmente son reportados en la literatura. Estas condiciones de trabajo resultan necesarias para poder abordar, en próximos trabajos, el estudio de los problemas propios de las imágenes en dispositivos holográficos.

Es importante mencionar que aunque en este trabajo se obtuvieron estereogramas holográficos, no se pretendía estudiar los problemas generales inherentes al registro de estereogramas bajo métodos holográficos, sino generar las condiciones experimentales para conocer las posibilidades y alcances del sistema de proyección

y los elementos mecánicos utilizados bajo condiciones de iluminación coherente con un láser de baja potencia. Así que estos resultados constituyen el punto de partida para la obtención de estereogramas holográficos de otra índole. En este sentido, se pretende que este trabajo constituya un referente para el desarrollo de la estereoscopía holográfica en nuestro país.

Referencias

- [1] F. J. Torcal Milla, M. V. Collados, M. Quintanilla, J. Tornos y J. Atencia. "Realización de estereogramas holográficos a partir de imágenes sintéticas". Óptica pura y aplicada Vol 44. Sociedad Española de Óptica. Páginas 185-196 (2011).
- [2] Holophile. Inc 1995-2011. History about Holography. (Citada: Marzo 2011) <<http://www.holophile.com/history.htm>>.
- [3] G. Saxby. "Practical Holography". Editorial IoP. Tercera Edición. Reino Unido. (2004). pp 279-315.
- [4] S. A. Benton. V. M. Bove, Jr. "Holographic Imaging". (2008) Editorial Wiley Interscience. Estados Unidos de América. pp 137-144
- [5] M. W. Halle, S. Benton, M. A. Klug, J. S. Underkoffler. "The Ultragram: a Generalized Holographic Stereogram" MIT Media Laboratory. (Febrero 1991) SPIE Proceedings # 1461 "Practical Holography V".
- [6] M.W.Halle. "The Generalized Holographic Stereogram" Massachusetts Institute of Technology. Thesis Master of Science in Visual Studies. (Febrero 1991). 134 páginas.
- [7] M. Yamaguchi, N. Ohyama, and T. Honda, "Holographic 3-D printer," Practical Holography IV, S. A. Benton ed., Proc. Soc. Photo-Opt. Instrum. Eng. 1212, (1990) 84-92
- [8] Full-Parallax Holographic 3D printer. (Citada: Julio 2011) <<http://www.isl.titech.ac.jp/~guchi/holo/holoprinter-e.html>>.
- [9] K. E.Olsen. "Holographic multi-stereogram constructed from computer images : Applied 3-D printer". Universidad de Bergen. Cand. scient. thesis in Optics and Laser Physics (Mayo 1996). 142 páginas.
- [10] L.E. Helseth and I. Singstad. "Diffusers for holographic stereography". Optics Communications 193 (2001) pp 81-86.
- [11] Holophile. Inc 1995-2011. Dennis Gabor. Autobiography. (Citada Agosto 2011) <<http://www.holophile.com/html/gabor.htm>>.

- [12] L.M. Giraldo. “Exploración experimental del proceso de obtención de rejillas de difracción holográficas en relieve”. Medellín: Informe Interno Proyecto Avanzado II – Universidad EAFIT (2011).
- [13] G. K. Ackermann and J. Eichler “ Holography: A practical Approach” (2007). Editorial Wiley-VCH. Alemania. pp 3-42
- [14] P. Hariharan. “Optical Holography: Principles, Techniques and Applications”. (1996). Cambridge University Press. pp 45.
- [15] D. Velásquez Prieto. “Estudio experimental de medios de registro para la obtención de hologramas a color”. Medellín: Informe Interno Proyecto de Investigación – Grupo de Óptica Aplicada. Universidad EAFIT (2011).
- [16] S. Epelbaum. “Historia de la estereoscopía y sus aplicaciones” Arch. Oftal. Buenos Aires. Vol 81 No2; pág 62-67 (2010).
- [17] Historia de la estereoscopía. (Citada: Agosto 2011) <<http://www.red3i.es/stereoweb/historia.htm>>.
- [18] Estereoscopía o Visión 3D. (Citada Mayo2012).<[http://sophia.javeriana.edu.co/~cbustaca/Realidad %20Virtual/material/clase14/estereoscopia.pdf](http://sophia.javeriana.edu.co/~cbustaca/Realidad%20Virtual/material/clase14/estereoscopia.pdf)>.
- [19] “StereoGraphics Developers’ Handbook” Background on Creating Images for CrystalEyes® and SimulEyes®. StereoGraphics Corporation (1997).
- [20] L. Jauregui. “Fotogrametría Básica”. Páginas 81-90.
- [21] A. Woods. “Understanding Crosstalk in Stereoscopic Displays” Conference on 3DSA Three-Dimensional Systems and Applications. Tokyo, Japón. (2010).
- [22] D. Pizzanelli. “The development of direct-write digital holography”. Conference on Holography, Art and Design, Royal College of Art. (Marzo 2002). 26 páginas.
- [23] “A holographic portrait of Queen Elizabeth II”. (Citada Agosto 2011). http://www.rob-munday.com/queen_elizabeth_ii.pdf
- [24] D.J,DeBitetto. “Holographic panoramic stereograms synthesized from white-light recordings”. Applied Optics, Vol 8, (1969) pp.1740-1.

- [25] L. Huff and R.L Fussek. "Cylindrical holographic stereograms". International symposium on Display Holography, Lake Forest, Vol. 1, (1982) pp. 91-147
- [26] E. Dalsgaard and P.E Ibsen. "Some applications of LCD in holography" International symposium on Display holography, Lake Forest, Vol 3, (1988). pp. 327-336
- [27] S. Smith and T.H Jeong. US Patent no 5 022 727, (1990)
- [28] M. Lucente. "Diffraction-Specific fringe computation for Electro-Holography". Massachusetts Institute of Technology. Thesis Doctoral. Dpto of Electrical Engineering and Computer Science (Septiembre 1994).
- [29] M. A. Klug, A. Klein, W. Plesniak, A. Kropp, B. Chen. "Optics for full-parallax holographic stereograms". MIT Media Laboratory. Practical Holography XI and Holographic Materials III, Proc SPIE, Vol 3011 (1997) pp 78-88.
- [30] M. W Halle. "Holographic Stereograms as discrete imaging systems" MIT Media Laboratory. Practical Holography VIII, Proc SPIE, Vol 2176 (1994) pp 73-84
- [31] M. Teitel. "Anamorphic Raytracing for synthetic Alcove Holographic Stereograms" Massachusetts Institute of Technology. Thesis Master of Science. (Septiembre 1986). 49 páginas.
- [32] M. A. Klug and M. Holzbach. US Patent no 6 631 016, (2003)
- [33] "Emulsions for Holography" (Citada: Abril 2012) <<http://www.slavich.com/technical.htm>>
- [34] "Ives Gentet. The Ultimate Holography – Origination and Replication" (Citada: Abril 2012) <<http://www.ultimate-holography.com/en/materials.html>>
- [35] A. Burman. "Caracterización y control de un Microdisplay como modulador espacial de luz". Universidad de Buenos Aires. Tesis de grado en Ingeniería Electrónica. (Diciembre 2010). 139 páginas.
- [36] D. de Dios, P. García Martínez. J. García. "Método de calibración en tiempo real para moduladores de cristal líquido". Óptica pura y Aplicada. Vol 38 N°2. (2005) pp 67-74.
- [37] C. Dobersi, E. Rueda, M. Tebaldi, R Torroba y N. Bolognini. "Optimized characterization for a spatial light modulator under less restrictive operating conditions" Conference Proceedings 992, RIAO/OPTILAS (2007)
- [38] 3M Displays Films. LCD Optics 101. (Citada: Mayo 2012) <http://www.solutions.3m.com/wps/portal/3M/en_US/vikuiti1>.

- [39] M. S. Millán, J. Escofet, E. Pérez. “Óptica Geométrica”. (2004) Editorial Ariel. S.A. España. pp 209-212.